

## **Kvantový radar – principy a perspektiva**

### **Quantum Radar - Principles and Perspectives**

**Michal Křelina**

**Abstrakt:** Článek představuje úvod do kvantových radarů, které v blízké budoucnosti mohou znamenat revoluci na současném bojišti. Cílem článku je představit základní principy kvantových radarů bez detailní znalosti kvantové mechaniky, jejíž podstatné vlastnosti a jevy pro kvantový radar budou nastíněny. Po fyzikálním úvodu jsou představeny tři základní návrhy, jak by kvantový radar mohl fungovat a jaké přednosti mají jednotlivé návrhy. Detailněji budou popsány základní výhody kvantových radarů, jako je kvantový radarový účinný průřez, obtížná rušitelnost a lokalizace. Dále bude probrán současný stav vývoje a klíčové součásti kvantového radaru, další potenciální využití a nakonec budou diskutovány časové rámce možného nasazení a oblast kvantového elektronického boje.

**Abstract:** This paper provides an introduction to the quantum radars that can cause a revolution in the modern warfare in the near future. The goal of the paper is to present basic principles of quantum radars without deep knowledge of quantum mechanics, where its properties and phenomena important for the quantum radar will be outlined. After the physics introduction, the three basic designs of how the quantum radar could work will be presented as well as their advantages. In more details, the main benefits of quantum radars including higher quantum radar cross section and more difficult jamming and localization will be discussed. Next, the state-of-the-art research, the important technologies for quantum radar and its other applications will be commented. Finally, the time scale of the first prototypes and the role of the quantum electronic warfare will be discussed.

**Klíčová slova:** Kvantový radar; kvantová mechanika; elektronický boj.

**Key words:** Quantum Radar; Quantum Mechanics; Electronic Warfare.

## ÚVOD

Radar představuje jednu z klíčových technologií, která byla vyvinuta v první polovině dvacátého století a hned v druhé světové válce, kde byla tato technologie nasazena už v relativně velkém měřítku, se ukázala nesmírná důležitost této technologie ve vojenské oblasti a následně i v civilní.

Dnes je radar zcela klíčovou technologií v oblasti vojenství, kde se používá k vyhledávání cílů, určení jejich polohy a trajektorie nejen pro letectví, ale i námořní a pozemní techniku, pohyb ve vesmíru, detekce projektilů a střel, navádění střel a mnoho dalšího. V civilním sektoru se s radary můžeme setkat v řízení letového provozu, určení výšky letadel, měření rychlosti u aut, parkovací senzory a senzory pro inteligentní samoříditelná auta, radary pro průzkum podzemí apod.

Velká část radarů většinou pracuje v oblasti metrových až milimetrových elektromagnetických vln, resp. jednotky MHz až stovky GHz. My se v rámci tohoto pojednání budeme zabývat primárně radary v oblasti jednotek GHz, které jsou používány jako přesné přehledové radary (cca do 500km) či jako naváděcí radary pro zbraňové systémy.

Kvantový radar (*quantum radar*) v elementárním principu funguje stejně jako radar klasický. Vygeneruje signál, ten se vyšle k cíli a signál odražený od cíle poté detekujeme. Hlavní rozdíl je, že nepracujeme s klasickým elektromagnetickým (EM) zářením, ale pracujeme na úrovni jednotlivých fotonů - elementární kvanta EM záření.

Kvantové radary proto vyžadují znalosti nejen klasické elektrodynamiky, ale i kvantové fyziky, konkrétně kvantové elektrodynamiky, kvantové optiky, kvantové informatiky a jiných.

O technologii kvantového radaru se mluví jako revoluční technologii podobně, jako byl přínos klasického radaru v první polovině 20. století<sup>1</sup>. Tou hlavní výhodou kvantového radaru je větší radarový účinný průřez (*Radar Cross Section - RCS*), kde u kvantového radaru budeme mluvit o tzv. kvantovém radarovém účinném průřezu (*Quantum Radar Cross Section - QRCS*). První simulace ukazují, že dle množství fotonů můžeme mít větší QRCS pro postranní laloky nebo velmi vysoký a úzký účinný průřez pro čelní odraz.

Další výhodou, použijí-li se kvantově provázané fotony, je až exponenciálně větší náročnost rušit kvantový radar v porovnání s klasickým radarem<sup>1</sup>. Třetí velkou výhodou je složitá lokalizace kvantového radaru a s klesajícím množstvím použitých fotonů se limitně blížíme k téměř nemožnosti lokalizovat kvantový radar obzvláště v prostředí s vysokým pozadím s klasickými prostředky elektronického boje.

O kvantovém radaru se také v poslední době mluví v souvislosti s prohlášením Číny, že již má k dispozici funkční kvantový radar schopný detekce na vzdálenost 100 km<sup>2</sup>. Cílem tohoto příspěvku je nastínit lidem neznalých kvantové mechaniky princip kvantového radaru, který je některými médii, která dále šířila informaci o čínském kvantovém radaru,

1 LANZAGORTA, Marco. Quantum Radar. *Synthesis Lectures on Quantum Computing* [online]. 2011, 3(1), 1-139 [cit. 2017-09-06]. DOI: 10.2200/S00384ED1V01Y201110QMCM005. ISSN 1945-9726.

2 China successfully develops quantum radar system. In: *Global Times* [online]. Čína: Global Times, 2016 [cit. 2017-09-06]. Dostupné z: <http://www.globaltimes.cn/content/1005525.shtml>

popisován nesprávně. Dále budou představeny hlavní současné návrhy a předpokládané konstrukce, možnosti realizace kvantového radaru a jeho další uplatnění. Popsány budou výhody kvantového radaru a případný význam při nasazení na současném bojišti. Ke konci bude shrnut současný stav vývoje a diskuse o dalším výzkumu a očekávání ohledně kvantového radarového systému v blízké budoucnosti.

## 1. KVANTOVÝ RADAR

### 1.1 FYZIKÁLNÍ PRINCIP

Kvantový radar, stejně jako klasický radar, pracuje s elektromagnetickým zářením jen s tím rozdílem, že pracuje přímo s jednotlivými kvanty elektromagnetického záření, tj. s fotony, jednotlivě nebo téměř jednotlivě. Klasická elektrodynamika, která se používá pro popis klasického radaru, je poměrně stará teorie, která je však dobře popsána a výborně funguje v klasickém (makroskopickém) světě. Navíc ve vztahu ke klasickým radarům existuje spousta metod, postupů a měření, například určení útlumu v atmosféře nebo výpočet radarového účinného průřezu.

Pro studium kvantových radarů je již potřeba použít kvantovou verzi elektrodynamiky, tzv. kvantovou elektrodynamiku a to hlavně podobor kvantovou optiku. Současná kvantová optika již poskytuje základní rovnice a mechanismy, které by v principu měly stačit na popis kvantového radaru. V praxi je to mnohem složitější, neboť samotné rovnice jsou velice složité a náročné pro výpočet. Proto se část zanedbatelných efektů opomíjí a ostatní efekty je snaha popsat nějakým jednodušším přibližným modelem.

Pro představu, jaký je rozdíl mezi klasickým a kvantovým přístupem k elektromagnetickému záření, se podíváme na následující příklad. Mějme pulsní radar s výkonem v pulsu kW a prahovou citlivostí W pracující na frekvenci 9 GHz. Uvážíme-li, že jeden foton má energii, pak výkon v pulsu odpovídá množství vyzářených fotonů a prahová citlivost pak odpovídá množství fotonům. V případě kvantových radarů se bavíme v teorii o jednotlivých fotonech a v praxi o desítkách až stovkách tisíc (na přijímači).

V následujícím textu budeme výhradně uvažovat o fotonech ve frekvenčním pásmu, tzn. 8-12 GHz. Nicméně stejné principy a rovnice lze aplikovat i pro jiné frekvence fotonů, včetně těch v optické oblasti, kde se fotony liší energií, resp. vlnovou délkou, ale teorie zůstává stejná.

Ve studii pro americkou agenturu DARPA<sup>3</sup> byly definovány základní tři fyzikální typy kvantových radarů:

<sup>3</sup> BURDGE, G., G. DEIBNER, J. SHAPRIO, et al. *Quantum Sensor Program: Final Technical Report*. AFRL-RI-RS-TR-2009-208. Melbourne, FL, USA, 2009. Dostupné také z: [www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA506209](http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA506209)

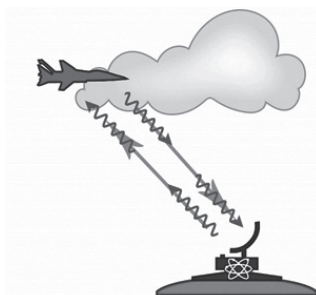
- **Typ-1:** vysílá kvantové stavy fotonů bez kvantového provázání a ty následně detekuje. Pracuje s jednotlivými fotony.
- **Typ-2:** vysílá klasický signál, např. laserový pulz, ale pro detekci používá kvantový detektor/přijímač, který zvyšuje schopnosti takového radaru. Odpovídá kvantovým LADARům (nebo také LIDAR, laserový radar).
- **Typ-3:** pracuje s kvantovým provázáním dvou fotonů. Jeden je vyzářen a druhý je držen v zařízení. Po návratu vyzářeného fotonu se provede korelace obou fotonů.

Pro potřeby v dalším textu, připomeňme, že foton je nehmotná částice, bez náboje a se spinem 1, tzn., že může nabývat dvě různé polarizace při měření.

## 1.2 RADAR S JEDNOTLIVÝMI FOTONY (SINGLE PHOTON)

Kvantový radar pracující s jednotlivými fotony odpovídá typu-1. Tento typ radaru funguje velice podobně, jako klasický radar. Zde vysílač vyšle jednotlivé fotony, ty se odrazí od cíle a následně se detekují ve kvantovém detektoru, viz Obrázek č. 1. Výhodou je, že kvantový radarový účinný průřez je větší, než klasický, což umožňuje detekovat i stealth letadla, která jsou charakterizována velmi malým RCS. Naopak velkou výzvou je detekce odraženého fotonu, kde je potřeba rozlišit ty jednotlivé správné fotony v obrovské záplavě ostatních fotonů na stejné frekvenci pocházejících z jiných zdrojů signálů nebo z přirozeného šumu.

Tento typ-1 kvantový radar je však v praxi nerealizovatelný, neboť není prakticky možné detekovat jednotlivé odražené fotony v obrovském pozadí, které se tu přirozeně vyskytuje. Jedná se spíše o teoretický model, pomocí kterého lze popsat kvantový radarový účinný průřez nebo studovat zeslabení v atmosféře.

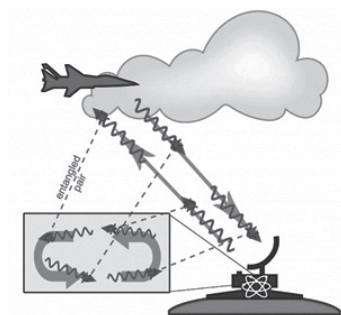


**Obrázek č. 1:** Princip kvantového radaru s jednotlivými fotony.

## 1.2 RADAR S KVANTOVĚ PROVÁZANÝM FOTONY (ENTANGLED PHOTONS)

Jedná se o kvantový radar typu-3. Kvantově provázané fotony představují speciální jev z kvantové fyziky, který v klasické fyzice nemá obdobu, a nejbliž tomuto jevu budeme, pokud řekneme, že oba fotony jsou korelovány. Více o kvantovém provázání viz dále. Ve zkratce je princip takový, že známe celkovou polarizaci dvou fotonů, která je například 0. To jest, že oba fotony mají opačnou polarizaci, ale nevíme, který má jakou. Toho lze využít, a v tom také spočívá hlavní výhoda kvantového provázání, pro jednodušší identifikaci fotonů v detektoru, kde díky korelaci mezi oběma fotony lze snadněji identifikovat náš příchozí konkrétní foton po změření toho druhého fotonu drženého v radaru, viz Obrázek č 2.

Kvantové provázání reprezentuje jednu z hlavních výhod, proč se kvantovými radary zabývat. Cílem vývoje kvantových radarů je dosažení efektivního a spolehlivého kvantového radaru pracujícího právě s kvantově provázanými fotony s jejich minimálním počtem.

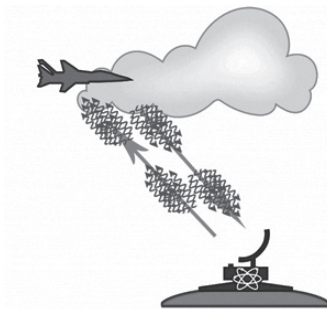


Obrázek č. 2: Princip kvantového radaru s provázanými páry fotonů.

## 1.3 RADAR S FOTONY V KOHERENTNÍM STAVU (COHERENCE STATE PHOTONS)

Fotony v koherentním stavu, známé také jako Gaussovské stavy, si lze představit jako skupinu několika fotonů - elektromagnetický puls, viz Obrázek č. 3. Jedná o kvantově-mechanický stav, který je nejbliž klasické fyzice, kde fotony v koherentním stavu mají neurčitost v určení pozice a hybnosti v čase konstantní, tzn., že takový stav je lokalizovaný po celou dobu pohybu, a proto k těmto stavům můžeme přistupovat jako ke klasické částici. Zároveň však můžeme využít kvantových vlastností měření. Další výhodou je, že kvantový stav po provedení měření se nezničí. Z hlediska naší typologie se jedná o kombinaci typu-2 a typu-1.

Tento typ je realizovatelný a z technického hlediska má tu výhodu, že nepotřebujeme detektor, který detekuje a rozliší všechny jednotlivé fotony, které na něj dopadnou, ale vystačíme si s kvantovou verzí homodynního měření. Koherentní stavy světla mohou rovněž být kvantově provázané.



**Obrázek č. 3:** Princip kvantového radaru s využitím koherentních stavů fotonů.

## 1.4 KVANTOVÉ VLASTNOSTI

V následujícím textu se lehce zmíníme o klíčových kvantových vlastnostech a přístupech, které jsou důležité pro kvantový radar a jeho pochopení.

### 1.4.1 Limity kvantového radaru

Celá kvantová mechanika je založena na Heisenbergově principu neurčitosti<sup>4</sup>, který říká, jak přesně nějaký kvantový systém můžeme změřit s ideálním měřením. Bylo ukázáno, že standardní kvantověmechanická měření jsou limitovaná tzv. klasickou limitou kvantové mechaniky<sup>5</sup>

$$\Delta\phi=1/\sqrt{N} ,$$

kteřá určuje, kolik je potřeba fotonů k dosažení přesnosti měření fáze . Tato limita je dána hlavně způsobem měření a je typická pro kvantové radary používající koherentní stavy fotonů nebo jednotlivé fotony. Avšak klasická limita kvantové mechaniky není fundamentální limitou kvantové mechaniky, tou je tzv. Heisenbergova limita

$$\Delta\phi=1/N ,$$

<sup>4</sup> HEISENBERG, W. Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik. *Zeitschrift für Physik* [online]. 1927, 43(3-4), 172-198 [cit. 2017-09-06]. DOI: 10.1007/BF01397280. ISSN 1434-6001.

<sup>5</sup> GIOVANNETTI, V. Quantum-Enhanced Measurements: Beating the Standard Quantum Limit. *Science* [online]. 2004, 306(5700), 1330-1336 [cit. 2017-09-06]. DOI: 10.1126/science.1104149. ISSN 0036-8075.

kteřá nezávisí na způsobu měření a je také nepřekročitelná<sup>5</sup>. V publikacích<sup>5,6</sup> bylo ukááno, že s použitím právě kvantového provázání lze dosáhnout této Heisenbergovy limity. To znamená, že při použití kvantově provázaných fotonů potřebujeme až kvadraticky méně fotonů než kvantový radar s jednotlivými fotony nebo koherentními stavy fotonů pro dosažení stejné přesnosti.

#### 1.4.2 Kvantové provázání

Kvantové provázání je pojmenování pro ryze kvantovou vlastnost, která v klasické fyzice nemá analogii. Pro příklad si vezměme rovnou foton. Jednou z kvantových vlastností fotonu je polarizace, která při měření může nabývat pouze jednou ze dvou hodnot, řekněme např.  $|+1\rangle_a$   $|-1\rangle_a$ .

Následně mějme zařízení, například excitovaný atom, které vygeneruje dva kvantově provázané fotony. Označme je např.  $a$  a  $b$  a oba fotony mají opačnou polarizaci. Kvantové provázání spočívá v tom, že nevíme, který z těchto dvou fotonů má jakou polarizaci, ale víme, že vždy bude opačná. Ve kvantové mechanice mluvíme tzv. o kvantové superpozici. To znamená, že máme dvě možné konfigurace,  $|+1\rangle_a$   $|-1\rangle_b$  a  $|-1\rangle_a$   $|+1\rangle_b$ , které mají, pro jednoduchost uvažme, stejnou pravděpodobnost 50 %.

Následně provedeme měření fotonu  $a$ . Tímto dojde k tomu, že změříme jeden konkrétní stav a díky tomu pak okamžitě víme v jakém stavu je druhý foton. Toto tvrzení platí nezávisle na tom, jak daleko je druhý foton, tzn., jakmile změříme jeden, ihned je určena polarizace toho druhého libovolně daleko. Měřením fotonu  $b$ , libovolně daleko, pak opravdu naměříme opačnou polarizaci než u fotonu  $a$ . Prvním měřením se ale také zničí toto kvantové provázání, tzv. dekoheruje, a pro jakákoliv další měření již neplatí, že víme, že druhý foton je v opačném stavu. To znamená, že pokud bychom změřili foton  $a$  dlouho před tím, než budeme měřit foton  $b$ , tak pak nemusí platit, že budou mít opačné polarizace i v době měření fotonu  $b$ . Foton  $b$  může cestou interagovat a změnit polarizaci, ale to my už nevíme.

Problémem kvantového provázání je jeho křehkost. Je velká, šance, že při průchodu kvantově provázaného fotonu atmosférou dojde k interakci, která povede k dekoherenci. Z pohledu fotonu se jedná o měření, tudíž pak platí více popsaná situace o předčasném změření jednoho z fotonů.

V podstatě se jedná o korelaci, kdy první měření určí to druhé, ale nicméně konkrétní změřené hodnoty jsou zcela náhodné. Pro více informací v podobě pochopitelné i pro širší publikum můžeme odkázat na článek v časopise *Vesmír*<sup>7</sup>.

V ideálním případě si kvantový radar s kvantově provázanými fotony můžeme představit následovně. Vytvoříme pár kvantově provázaných fotonů. Jeden si podržíme v radaru a druhý pošleme ven. V případě že se v oblasti vyskytuje cíl a foton se od něj odrazí zpátky do detektoru, tak dojde k jeho změření. Ve zhruba stejném momentě změříme i držený foton. Jeho změření nám prozradí, jakou má polarizaci foton, který cestoval

<sup>6</sup> GIOVANNETTI, Vittorio, Seth LLOYD a Lorenzo MACCONE. Quantum Metrology. *Physical Review Letters* [online]. 2006, 96(1), - [cit. 2017-09-06]. DOI: 10.1103/PhysRevLett.96.010401. ISSN 0031-9007.

<sup>7</sup> DUŠEK, Miloslav a Pavel CEJNAR. Kvantové hlavolamy V. *Vesmír* [online]. 1998, 77(7), 393- [cit. 2017-09-06]. ISSN 1214-4029. Dostupné z: <http://casopis.vesmir.cz/clanek/kvantove-hlavolamy-v>

a vrátil se. Uvážíme-li více fotonů, pak z měření držených fotonů dostaneme kombinaci, kterou hledáme v tom, co změřil detektor, který změřil nejen naše odražené fotony, ale i šum a pozadí. Větší množství fotonů nám pak dá unikátní kombinaci, kterou lze statisticky identifikovat i v obrovském pozadí.

### 1.4.3 Zeslabení v atmosféře

Stejně jako klasický radar i kvantový radar je limitován atmosférou, resp. průchodem fotonů atmosférou. V zásadě by se měla počítat každá možná interakce letícího fotonu s jednotlivými atomy, které mu leží v cestě. Ve kvantové optice existují příslušné rovnice<sup>8</sup>, které však vedou k dlouhým a složitým výrazům, jejichž praktický výpočet je značně náročný. Jednodušší rovnice lze získat, například pokud uvážíme zjednodušení, že každé rozptylové centrum si lze představit jako řetěz polopropustných zrcadel<sup>9</sup>. Tento přístup má i tu výhodu, že k popisu atmosféry používá koeficienty zeslabení a indexy lomu, které známe z klasické optiky, a používají se pro výpočty pro klasické radary<sup>10</sup>.

V případě kvantových radarů lze žádané Heisenbergovy limity dosáhnout pouze pro velmi krátké vzdálenosti. Dokonce od jisté vzdálenosti dosáhneme větší přesnosti s jednotlivými fotony než s kvantově provázanými fotony. Například, pokud se uváží zeslabení  $\chi_c=0.0016/\text{km}$  (odpovídá viditelnosti na 300 m), lze ukázat<sup>1</sup>, že kvantově provázané fotony se dostanou od Heisenbergovy limity na standardní kvantovou limitu již na 350 km. Na hodnotě 550 km vyjde použití kvantově provázaných a neprovázaných fotonů na stejno a pak chyba kvantově provázaných fotonů roste rychleji, než kvantově neprovázaných fotonů.

Nicméně, v dalších pracích<sup>11</sup> je ukázáno, že pokud se použije metoda adaptivních optických korekcí, podobných jako se používají pro pozemní observatoře za účelem korekce na atmosféru, lze dosáhnout až 1000 km, než se s kvantově provázanými fotony dostaneme na standardní kvantovou limitu.

Pro úplnost dodejme, že pozadí pro naše fotony tvoří nejen ostatní zařízení, která vysílají na stejnou nebo blízkou frekvenci, ale na úrovni, kdy se zabýváme jednotlivými fotony mají vliv i např. fotony vyzářené sluncem rovněž v mikrovlnné oblasti<sup>12</sup>.

<sup>8</sup> HUTTNER, Bruno a Stephen M. BARNETT. Quantization of the electromagnetic field in dielectrics. *Physical Review A* [online]. 1992, 46(7), 4306-4322 [cit. 2017-09-06]. DOI: 10.1103/PhysRevA.46.4306. ISSN 1050-2947.

<sup>9</sup> JEFFERS, J. R., N. IMOTO a R. LOUDON. Quantum optics of traveling-wave attenuators and amplifiers. *Physical Review A* [online]. 1993, 47(4), 3346-3359 [cit. 2017-09-06]. DOI: 10.1103/PhysRevA.47.3346. ISSN 1050-2947.

<sup>10</sup> SKOLNIK, Merrill I. *Radar handbook*. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, c2008. ISBN 9780071485470.

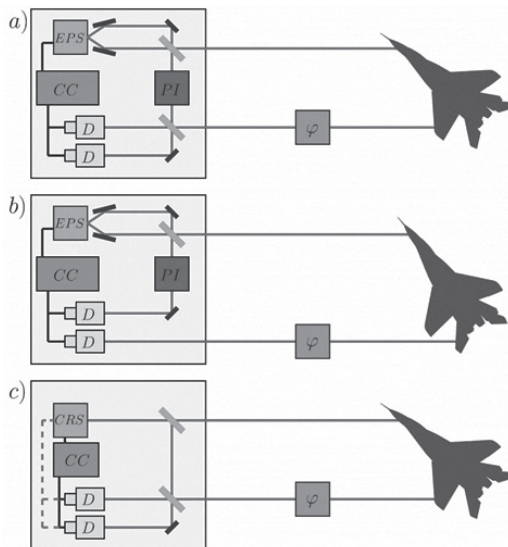
<sup>11</sup> SMITH III, James F. Quantum entangled radar theory and a correction method for the effects of the atmosphere on entanglement. In: *Proc. SPIE* [online]. 7342. 2009, 73420A-12 [cit. 2017-09-06]. DOI: 10.1117/12.819918.

<sup>12</sup> LANZAGORTA, Marco. Low-brightness quantum radar. In: *Proc. SPIE* [online]. 9461. 2015, s. 946113-25 [cit. 2017-09-06]. DOI: 10.1117/12.2177577.



## 2. DESIGN

V současnosti se v literatuře uvádějí tři principiální technické návrhy pro kvantové radary. Kromě posledního využívajícího homodynního měření, mohou ostatní využívat všech tří základních fyzikálních principů kvantových radarů.



**Obrázek č. 4:** Tři návrhy kvantových radarů: a) kvantová interference, b) kvantová iluminace, c) kvantové homodynní měření. Tmavě modré obdélníky představují zrcadla, světle modré obdélníky představují polopropustná zrcadla, červená čára reprezentuje šíření fotonů a jednotlivé součásti jsou: EPS - zdroj kvantově provázaných fotonů, CRS - zdroj koherentních fotonů, PI - zadržení, zpoždění druhého držení fotonu, D - detektor, CC - řídicí počítač a  $\varphi$  je fázové zpoždění, reprezentující cestu k cíli a zpět.

### 2.1 KVANTOVÁ INTERFERENCE

Jeden z prvních návrhů, jak by principiálně mohl kvantový radar fungovat je na bázi kvantové interference, Obrázek č. 4 a). Konkrétně se jedná o variaci Mach-Zehnderova interferometru se dvěma zrcadly, dvěma děliči svazku a s jedním fázovým zpožděvačem. Hodnotu zpoždění  $\varphi$  lze určit měřením intenzity (počtem fotonů) obou svazků v detektorech. Při použití jednotlivých fotonů lze určit hodnotu  $\varphi$  se statistickou chybou úměrnou  $1/\sqrt{N}$ , kde  $N$  je počet fotonů.

Podobně si to můžeme představit v případě kvantového radaru, kde fázové zpoždění  $\varphi$  si lze představit jako cestu fotonu k cíli a zpět. Lze ukázat, že chyba určení vzdálenosti je řádu

$$\Delta R = O(1/(\Delta\omega VN))$$

kde  $\Delta\omega$  je šířka pásma signálu<sup>5</sup>. Lepšího výsledku dosáhneme, pokud použijeme kvantově provázané dvojice fotonů. Jeden z fotonů pak bude poslán k cíli a druhý bude držen uvnitř radaru. Jejich vzájemná korelace při detekci při návratu odraženého fotonu od cíle umožňuje dosáhnout Heisenbergovy limity<sup>13</sup>. To znamená, že ke stejné přesnému měření potřebujeme kvadraticky méně fotonů.

Tento návrh vyžaduje, aby se obě dvojice provázaných fotonů měřily ve stejný čas, to znamená, že je potřeba vědět, jak dlouho druhý foton držet, než jej změříme společně s vracejícím se provázaným fotonem. To znamená, že potřebujeme dopředu vědět, jak daleko je přibližně cíl. Další nevýhodou je podmínka, že se kvantové provázání nenaruší (nedekoheruje). Kvantové provázání je velmi křehké a pravděpodobnost, že bude zničeno při průchodem atmosférou, není malá.

## 2.2 KVANTOVÁ ILUMINACE

Kvantová iluminace (*quantum illumination* - QI), Obrázek 4 b), je poměrně nová technika pro kvantová měření vyvinuta na Massachusetts Institute of Technology v USA (MIT)<sup>14</sup> primárně pro viditelné světlo. Princip je však univerzální a lze jej aplikovat i na fotony v oblasti gigahertzových frekvencí<sup>15</sup>. Tato technika umožňuje detekci signálu v prostředí s vysokým šumem a ztrátami. Ve skutečnosti, pokud se tato metoda aplikuje v kombinaci s kvantovým provázáním, tak prakticky funguje jenom pro prostředí s vysokým šumem a ztrátami. Na rozdíl od měření založeného na kvantové interferenci, kvantová iluminace nemusí měřit žádnou fázi, ale vystačí si jenom s obyčejným počítáním množství fotonů.

Z technického hlediska je tou hlavní výzvou postavit takový kvantový detektor, který bude detekovat jednotlivé fotony s vysokou účinností, přesností a rychlostí.

Původní práce připouštěla jen jednotlivé kvantové částice, ať už kvantově provázané nebo neprovázané. Pozdější práce ukázaly, že metoda kvantové iluminace lze použít i pro

<sup>13</sup> KAPALE, Kishore T., Leo D. DIDOMENICO, Hwang LEE, Pieter KOK a Jonathan P. DOWLING. Quantum Interferometric Sensors. In: *ArXiv* [online]. ArXiv:quant-ph/0507150. 2005 [cit. 2017-09-06].

<sup>14</sup> LLOYD, S. Enhanced Sensitivity of Photodetection via Quantum Illumination. *Science* [online]. 2008, 321(5895), 1463-1465 [cit. 2017-09-06]. DOI: 10.1126/science.1160627. ISSN 0036-8075.

<sup>15</sup> BARZANJEH, Shabir, Saikat GUHA, Christian WEEDBROOK, David VITALI, Jeffrey H. SHAPIRO a Stefano PIRANDOLA. Microwave Quantum Illumination. *Physical Review Letters* [online]. 2015, 114(8), - [cit. 2017-09-06]. DOI: 10.1103/PhysRevLett.114.080503. ISSN 0031-9007.

kvantově provázané koherentní stavy fotonů<sup>16,17</sup>. Kvantová iluminace pro provázané koherentní stavy fotonů nabízí až o 6 dB lepší měření. Také nabízí lepší rozlišení mezi dvěma cíli blízko sebe<sup>18</sup>.

Na první pohled kvantová iluminace trpí stejnými neduhy, jako předchází návrh. Nicméně další práce<sup>19</sup> ukázala, že jisté korelace zůstávají i při dekoherenci (zničení kvantového provázání) obou párů fotonů. To vede k návrhu, že se druhý, držený, foton změní ihned<sup>20</sup>. Zároveň se uloží informace o tomto měření, které budou fungovat jako časové razítko. Poté se provede měření všech přichozím fotonů, mezi kterými jsou nebo nejsou i odražené naše fotony a z výsledné korelace lze říci, zda něco vidíme a z časové stopy získáme i informace o vzdálenosti cíle. I když nevyužíváme přímo kvantového provázání, stále zbylé korelace nám umožňují určit vzdálenost cíle v určitém rozsahu s bezkonkurenčním rozlišením<sup>20</sup>.

Kvantová iluminace proto představuje hlavního kandidáta na princip, jakým by mohl pracovat kvantový radar.

### 2.3 KVANTOVÉ HOMODYNNÍ MĚŘENÍ

Kvantové homodynní měření je známé z kvantové optiky a jeho principy pocházejí z klasické elektrotechniky, Obrázek č. 4 c). Základní konfigurace je podobná Michelsonovu interferometru. Máme zde zdroj koherentních stavů fotonů, kde část vyšleme k cíli a druhá část poslouží jako signál z lokálního oscilátoru, podobně jako klasická homodynní detekce. Na Obrázku č. 4 c) pak růžová přerušovaná čára reprezentuje fakt, že vyslané koherentní stavy a lokální využívají stejný oscilátor. Následně jsou detekované a lokální koherentní stavy smíchané a z rozdílů intenzit lze určit fázový faktor  $\varphi$ .

<sup>16</sup> TAN, Si-Hui, Baris I. ERKMEN, Vittorio GIOVANNETTI, Saikat GUHA, Seth LLOYD, Lorenzo MACCONE, Stefano PIRANDOLA a Jeffrey H. SHAPIRO. Quantum Illumination with Gaussian States. *Physical Review Letters* [online]. 2008, 101(25), - [cit. 2017-09-06]. DOI: 10.1103/PhysRevLett.101.253601. ISSN 0031-9007.

<sup>17</sup> SHAPIRO, Jeffrey H a Seth LLOYD. Quantum illumination versus coherent-state target detection. *New Journal of Physics* [online]. 2009, 11(6), 063045- [cit. 2017-09-06]. DOI: 10.1088/1367-2630/11/6/063045. ISSN 1367-2630.

<sup>18</sup> GUHA, Saikat, Jeffrey H. SHAPIRO, Timothy RALPH a Ping Koy LAM. Enhanced standoff sensing resolution using quantum illumination. In: *AIP Conference Proceedings* [online]. 1363. 2011, s. 113-116 [cit. 2017-09-06]. DOI: 10.1063/1.3630159.

<sup>19</sup> OLLIVIER, Harold a Wojciech H. ZUREK. Quantum Discord: A Measure of the Quantumness of Correlations. *Physical Review Letters* [online]. 2001, 88(1), - [cit. 2017-09-06]. DOI: 10.1103/PhysRevLett.88.017901. ISSN 0031-9007.

<sup>20</sup> BRANDSEMA, Matthew J., Ram M. NARAYANAN a Marco LANZAGORTA. Range detection using entangled optical photons. In: *Proc. SPIE* [online]. 9461, s. 946111-10 [cit. 2017-09-06]. DOI: 10.1117/12.2176756.

Jeden z prvních návrhu kvantové homodynní detekce pro použití pro kvantové radary<sup>21</sup>, popisuje i design, který umožní měřit velmi citlivě i elevační úhel. Pokud se použijí přijímače čtyři, pak lze současně měřit vzdálenost i elevační úhel<sup>22</sup>.

Výhodou je, že koherentní stavy fotonů jsou odolnější než kvantově provázané stavy dvojic fotonů. Další výhodou je, že nepotřebujeme nutně detektor, který rozliší jednotlivé fotony, stačí, když detekuje onen shluk koherentních fotonů. Nevýhodou pak je, že tyto signály jsou lépe detekovatelné i nepřátelskými detektory a nelze se dostat na Heisenbergovu limitu.

### 3. VÝHODY

Kvantový radar by při nasazení na současném bojišti přinesl značné až revoluční výhody oproti radarům klasickým. Obecným předpokladem a benefitem je, že samotný kvantový radar může být poměrně dost malé zařízení, takže by jej mělo jít nasadit ve stejném a pravděpodobně i ve větším měřítku, než klasické současné radary.

Dále, hlavní výhodou je větší kvantový radarový účinný průřez, který umožní vidět i stealth letadla a zároveň, díky relativně malému množství fotonů, může sám zůstat poměrně dobře skryt. Použití kvantového provázání umožní použít nejen menší množství fotonů, ale až exponenciálně snižují možnost jeho rušení.

#### 3.1 KVANTOVÝ RADAROVÝ ÚČINNÝ PRŮŘEZ

Jedna ze základních veličin v oblasti radarů je tzv. radarový účinný průřez, který reprezentuje vlastnosti cíle a konkrétně představuje efektivní odraznou plochu. Klasický radarový účinný průřez  $\sigma_c$  lze formálně definovat jako poměr odraženého výkonu  $P$  k výkonu dopadajícímu

$$\sigma_c = P/W.$$

V případě kvantového radaru, kde pracujeme s jednotlivými fotony a interakce s cílem je interakce fotonu s atomy na povrchu podle pravidel kvantové elektrodynamiky, by použití stejné definice bylo nekonzistentní. Proto byl zaveden tzv. kvantový radarový účinný průřez (*quantum radar cross section* - QRCS)<sup>23</sup>

<sup>21</sup> JIANG, Kebei, Hwang LEE, Christopher C. GERRY a Jonathan P. DOWLING. Super-resolving quantum radar: Coherent-state sources with homodyne detection suffice to beat the diffraction limit. *Journal of Applied Physics* [online]. 2013, 114(19), 193102- [cit. 2017-09-06]. DOI: 10.1063/1.4829016. ISSN 0021-8979.

<sup>22</sup> BRADSEMA, Matthew J., Ram M. NARAYANAN a Marco LANZAGORTA. Design considerations for quantum radar implementation. In: *Proc. SPIE* [online]. 9077. 90770T-8 [cit. 2017-09-06]. DOI: 10.1117/12.2053117.

<sup>23</sup> LANZAGORTA, Marco. Quantum radar cross sections. In: *Proc. SPIE* [online]. 7727. 77270K-16 [cit. 2017-09-06]. DOI: 10.1117/12.854935.

$$\sigma_Q = \lim_{(R \rightarrow \infty)} 4\pi R^2 \langle I_s \rangle / \langle I_i \rangle$$

kde  $\langle I_s \rangle$  je intenzita odražených fotonů a  $\langle I_i \rangle$  je intenzita příchozích fotonů. Spočítat kvantový radarový účinný průřez však představuje skutečnou výzvu, neboť je potřeba spočítat interakce fotonů se všemi jednotlivými atomy na povrchu cíle.

Pro představu množství atomů uvažme například hliník, který na 1 cm<sup>2</sup> obsahuje řádově 10<sup>23</sup> atomů.

Z tohoto pohledu, pro velké komplexní cíle, jako je letadlo, se jedná v současné době v podstatě o nespočítatelnou úlohu. Naopak, tato úloha představuje zcela ideální úkol pro budoucí kvantové počítače<sup>24</sup>, které budou mít tu výhodu, že můžou počítat několik interakcí fotonů s atomy zároveň. Současný vývoj v oblasti QRCS se zaměřuje hlavně na jeho fyzikální popis a různá přiblížení a aproximace, která umožní alespoň přibližně QRCS popsat a spočítat. I přesto se výpočty provádějí pouze pro plochy s řádově statisíci atomy<sup>23</sup>. Pro více fotonů roste náročnost prakticky exponencialně<sup>1</sup>.

Již několik prací ukázalo zajímavé vlastnosti kvantového radarového účinného průřezu. V případě velmi malého počtu fotonů (ideálně jen jednoho), vykazuje čelní QRCS stejnou hodnotu pro hlavní lalok (odraz o 180° zpět k vysílači - žádoucí pro monostatický radar) jako RCS klasického radaru. Avšak vykazuje mnohem větší účinný průřez pro tzv. boční laloky, a čím větší úhel, tím je rozdíl větší. Tento jev má čistě kvantově mechanický původ v důsledku kvantových interferencí<sup>23</sup>. V případě klasického RCS také můžeme pozorovat postranní laloky, avšak ty jsou mnohem menší než v případě QRCS a jsou důsledkem nespojitosti na povrchu cíle. Tento efekt je dále zkoumán pro další možné strategie a návrhy kvantových radarů, které by tohoto jevu mohly využít.

V případě výpočtů s více fotony se zvýšený QRCS v bočních lalocích ztrácí a blíží se klasickému RCS tak, jak bychom očekávali. To však neplatí pro hlavní lalok, který s rostoucím počtem fotonů se zužuje a hlavně jeho amplituda roste, což je v rozporu s očekávanou limitou. To se děje v důsledku toho, že jednotlivé fotony nejsou nezávislé, ale jsou korelované. Tzn., že pokud se budeme dívat na ty fotony jednotlivě, tak získáme více informací o cíli<sup>23</sup>. Toto chování představuje jednu z klíčových vlastností a výhod kvantového radaru.

*Poznámka z pokročilé fyziky: toto chování je v pořádku, neboť přechod od kvantového chování kvantové elektrodynamiky ke klasické elektrodynamice vyžaduje nejen velký počet fotonů, ale zároveň i dekoherenci systému<sup>25</sup> (zde není myšleno dekoherence kvantově pro vázaných dvojic fotonů, ale zrušení korelace měřených fotonů odražených od stejného cíle).*

<sup>24</sup> LANZAGORTA, Marco a Salvador VENEGAS-ANDRACA. Algorithmic analysis of quantum radar cross sections. In: *Proc. SPIE: 9461* [online]. s. 946112-8 [cit. 2017-09-06]. DOI: 10.1117/12.2177238.

<sup>25</sup> BERESTECKIJ, Vladimir, Jevgenij LIFSHITZ a Lev PITAEVSKII. *Course of theoretical physics: Quantum Electrodynamics*. 2nd ed. Přeložil J. B. SYKES, přeložil J.S. BELL. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2008. ISBN 978-0750633710.

Kvantový radarový účinný průřez je v současnosti předmětem hlavně teoretického zkoumání, například QRCS pro komplexnější tvary<sup>26</sup>, vlivy elektrické a magnetické polarizace cíle<sup>27</sup>, polarizace fotonů samotných<sup>28</sup>, nebo různých materiálů cíle, např. dielektrikum<sup>29,30</sup>.

Vzhledem k tomu, že simulace a výpočty pracují jen s minimem fotonů a velmi malým množstvím atomů na povrchu cíle, tak stále nelze jednoznačně říci, jak se bude QRCS chovat pro makroskopické komplexní objekty. Toto představuje jednu z největších výzev.

### 3.2 ODOLNOST PROTI RUŠENÍ A OBTÍŽNÁ LOKALIZACE

V současné době lze popsat vztah radarů a systémů elektronického boje (EB), jako hru na kočku s myší, kde se technologie a schopnosti přizpůsobují tomu druhému. Při nasazení kvantových radarů se pozice současného elektronického boje značně ztíží.

Jedním ze standardních nástrojů elektronického boje je rušení. Zde odolnost kvantových radarů proti rušení je jednou z dalších zásadních výhod. Z pohledu kvantové fyziky představuje rušení vypuštění velkého množství fotonu v dané frekvenční oblasti za účelem skrýt odražené radarové fotony od cíle.

V případě kvantové iluminace pro případ kvantově neprovázaných fotonů můžeme určit poměr signál-rušení (*signal-to-jam ratio* - SJR) jako

$$SJR^{ne} \approx O(\eta/j),$$

kde  $\eta$  je odrazivost cíle a  $j$  je počet fotonů vypuštěných rušičkou. V případě kvantově provázaných fotonů dostaneme

$$SJR^{ne} \approx O(\eta/j \times 2^m)$$

<sup>26</sup> BRANDSEMA, Matthew J., Ram M. NARAYANAN a Marco LANZAGORTA. CROSS SECTION EQUIVALENCE BETWEEN PHOTONS AND NON-RELATIVISTIC MASSIVE PARTICLES FOR TARGETS WITH COMPLEX GEOMETRIES. *Progress In Electromagnetics Research M* [online]. 2017, **54**, 37-46 [cit. 2017-09-07]. DOI: 10.2528/PIERM16112308. ISSN 1937-8726.

<sup>27</sup> BRANDSEMA, Matthew J., Ram M. NARAYANAN a Marco LANZAGORTA. Electric and magnetic target polarization in quantum radar. In: *Proc. SPIE* [online]. 10188. 2017, 101880C-10 [cit. 2017-09-07]. DOI: 10.1117/12.2263517.

<sup>28</sup> BRANDSEMA, Matthew J., Ram M. NARAYANAN a Marco LANZAGORTA. The Effect of Polarization on the Quantum Radar Cross Section Response. *IEEE Journal of Quantum Electronics* [online]. 2017, **53**(2), 1-9 [cit. 2017-09-07]. DOI: 10.1109/JQE.2017.2657321. ISSN 0018-9197.

<sup>29</sup> LANZAGORTA, Marco, Jeffrey UHLMANN, Oliverio JITRIK, Salvador E. VENEGAS-ANDRACA a Seth WIESMAN. Quantum computation of the electromagnetic cross section of dielectric targets. In: *Proc. SPIE* [online]. 9829. 2016, 98291I-15 [cit. 2017-09-07]. DOI: 10.1117/12.2224078.

<sup>30</sup> SHI-LONG, Xu, Hu YI-HUA, Zhao NAN-XIANG, Wang YANG-YANG, Li LE a Guo LI-REN. Impact of metal target's atom lattice structure on its quantum radar cross-section. *Acta Physica Sinica* [online]. 2015, **64**(15), 154203 [cit. 2017-09-07]. DOI: 10.7498/aps.64.154203.

kde  $m$  je počet kvantově provázaných dvojic fotonů. To znamená, že kvantové radary s využitím kvantového provázání mohou být až s exponenciálně menší pravděpodobností rušeny než klasické radary. Detailnější simulace<sup>12</sup> ukazují, že rušící systém musí vynaložit až sedmkrát větší výkon na stejné rušení kvantového radaru jako klasického.

Další vlastností je obtížná lokalizace kvantového radaru, v podstatě můžeme o kvantovém radaru mluvit jako o stealth radaru. Pokud pracujeme jen s jednotkami fotonů, tak od jisté vzdálenosti je kvantový radar zcela nedetekovatelný, neboť pravděpodobnost, že se foton pohltí v atmosféře, je už příliš velká. Ani ve větší blízkosti to s detekcí kvantového radaru nebude jednoduché, neboť rozlišit nějaký radarový foton od obrovského množství ostatních je prakticky nemožné. To platí obzvláště v případech kvantově provázaných fotonů, kde si obecně vystačíme s menším množstvím fotonů a kde ona provázanost nám dává klíč rozpoznat právě ten náš foton. A pokud nepřátelský systém tento klíč nemá, tak se jedná o obzvláště obtížnou úlohu.

Neschopnost lokalizovat radar pak vede k tomu, že spousta nástrojů, které jde použít proti klasickému radaru nelze použít, např. protiradarové řízené střely či klasické metody elektronického klamání (*deception*) nebo velice neefektivně, např. u rušení potřebujeme nejen mnohem větší výkon, viz výše, ale pokud nevíme, kde je radar, potřebujeme rušit i mnohem větší oblast.

## 4. SOUČASNÝ STAV A VYHLÍDKY DO BUDOUCNA

Nelze přesně říci, jaký je skutečný současný stav v oblasti kvantových radarů, neboť vývoj probíhá v zásadě v utajení. Přibližný stav lze usuzovat z publikovaných informací, odborných článků a příbuzných technologií.

### 4.1 USA

Již v roce 2008 výzkumníci z Lockheed Martin<sup>31</sup> podali patent na kvantový radar, ale od té doby nejsou o tomto projektu žádné jiné informace.

Nejvíce veřejných informací lze získat z odborných publikací skupiny kolem M. Lanzaorty z US Naval Research Laboratory (US NRL) ve Washington DC, kteří publikovali řadu odborných textů v oblasti základních návrhů a designů kvantových radarů, jejich možné aplikace a rovněž udělali velký kus práce v oblasti teoretického popisu kvantového radarového účinného průřezu. Tyto publikace dávají veřejnosti možnost nahlédnout na směr vývoje a trendy v oblasti kvantových radarů.

Například první návrh kvantového interferenčního radaru v US NRL<sup>22</sup> pracoval s kvantovým radarem doplněným o klasický radar. Klasický radar zde má funkci pro první ná-

<sup>31</sup> ALLEN, E.H. a M. KARAGEORGIS. *Radar systems and methods using entangled quantum particles*. 2005. USA. US Patent 7,375,802. Zapsáno 4. srpen 2005.

střel vzdálenosti cíle a následně se tato informace použila pro dobu držení druhého fotonu, než byl změřen. Tento návrh tedy řeší jednu z důležitých věcí a to znalost, jak dlouho držet druhý foton pro správnou korelaci s fotonem, který se odrazil od cíle zpět do detektoru.

Lze také najít informace, že ve dnech 19. a 20. srpna 2014 proběhl v US NRL pracovní workshop<sup>12</sup>, Quantum Radar Research Work Meeting, jehož závěry jsou, že kvantový radar je dosažitelná technologie a může být vyvinuta v blízké budoucnosti.

## 4.2 ČÍNA

Minulý rok i Čína vydala prohlášení<sup>2</sup>, že vyvinula kvantový radar schopný detekce na vzdálenost 100 km. Nicméně články obsahují protichůdné informace, např. mluví o vývoji radaru s jedním fotonem (odpovídá typu-1) ale pak následně mluví o kvantovém provázání (odpovídá typ-3), rovněž i odborníci berou tuto zprávu s rezervou. Nicméně se jedná o potvrzení, že Čína kvantový radar skutečně vyvíjí a pravděpodobně pracuje již na nějakých laboratorních experimentech.

To, že v Číně pracují na kvantovém radaru a technologiích nutných k jeho konstrukci cíleně již několik let ukazuje analýza z Jamestown Foundation<sup>32</sup>, která nabízí seznam institucí, které obdrželi granty na projekty v oblasti kvantových radarů.

Čína již ukázala, že je světovým lídrem v oblasti kvantových technologií, zvláště v oblasti kvantových sítí a kvantové distribuci šifrovacích klíčů pomocí kvantového provázání. V roce 2017 čínští vědci publikovali článek o úspěšném přenosu kvantově provázaných fotonů (v oblasti viditelného světla) ze satelitu na oběžné dráze na základnu na Zemi. Pro představu, na základně na Zemi se podařilo zachytit průměrně jen jeden ze šesti milionů kvantově provázaných fotonů<sup>33</sup>.

## 4.3 TECHNOLOGIE

Pro kvantový radar jsou potřeba dvě klíčová zařízení, zdroj mikrovlnných fotonů a detektory, které umí tyto fotony detekovat jednotlivě. Jedním z hlavních kandidátů pro zdroj kvantově provázaných fotonů v mikrovlnné oblasti je technologie kvantových

<sup>32</sup> KANIA, Elsa a Stephen ARMITAGE. Disruption Under the Radar: Chinese Advances in Quantum Sensing. *China Brief* [online]. The Jamestown Foundation, 2017, 17(11) [cit. 2017-09-07]. Dostupné z: <https://jamestown.org/program/disruption-under-the-radar-chinese-advances-in-quantum-sensing/>

<sup>33</sup> YIN, Juan, Yuan CAO, Yu-Huai LI, et al. Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers. *Science* [online]. 2017, 356(6343), 1140-1144 [cit. 2017-09-07]. DOI: 10.1126/science.aan3211. ISSN 0036-8075.



teček<sup>34</sup>. V případě detekce jednotlivých fotonů je situace složitější. Na trhu jsou detektory, které umí efektivně detekovat jednotlivé fotony s vysokou energií, tzn. s vysokou frekvencí. Nicméně s klesající energií fotonů citlivost dramaticky klesá. Nedávno se však objevila nová práce<sup>35</sup>, která představuje detektor jednotlivých fotonů na bázi grafenu, který je schopný detekovat i jednotlivé gigahertzové fotony (konkrétně článek zmiňuje test 26 GHz fotonů). To už se velice blíží naší zájmové frekvenční oblasti.

Kromě vlastního vygenerování fotonů, jejich cestování k cíli a zpět a jejich detekce je potřeba vyřešit celé následné zpracování. Jsou zapotřebí speciální protokoly a metody pro zpracování signálů kvantových stavů, odfiltrování šumu včetně kvantového, určení chyby měření a také, dokud nebudou k dispozici kvantové počítače, bude potřeba vysoký výkon pro zpracování všech dat celého měření, kterého bude obrovské množství, neboť pracujeme s jednotlivými fotony. I tyto části kvantového radaru jsou ve vývoji ať už přímo v návaznosti na kvantový radar nebo pro aplikaci v jiných podobných kvantových technologiích.

#### 4.4 VYUŽITÍ KVANTOVÉHO RADARU

Funkční kvantový radar, kromě očekávatelného nasazení ve vojenských a později i civilních aplikacích, podobně jako klasické radary, nabízí díky svým kvantovým vlastnostem i další využití.

Existují návrhy, na jeho použití pro podvodní navigaci<sup>36</sup>, či přímo detekci objektů pod vodou<sup>37</sup> pomocí tzv. *Ghost imaging*. Ghost imaging je technika známá z kvantové optiky, která umožňuje klasickými velmi citlivými kamerami zobrazit objekt, zatímco samotný objekt je zasažen infračerveným zářením, které nelze detekovat s takovým rozlišením jako viditelné světlo. I tato metoda využívá kvantového provázání viditelného a infračerveného světla. Změnou vlnové délky infračerveného světla pak lze zjistit i chemické složení objektu. Některé tyto aplikace jsou již k dispozici a další jsou otázkou blízkých let.

<sup>34</sup> EMARY, C., B. TRAUZETTEL a C. W. J. BEENAKKER. Emission of Polarization-Entangled Microwave Photons from a Pair of Quantum Dots. *Physical Review Letters* [online]. 2005, **95**(12), - [cit. 2017-09-07]. DOI: 10.1103/PhysRevLett.95.127401. ISSN 0031-9007.

<sup>35</sup> WALSH, Evan D., Dmitri K. EFETOV, Gil-Ho LEE, et al. Graphene-Based Josephson-Junction Single-Photon Detector. *Physical Review Applied* [online]. 2017, **8**(2), - [cit. 2017-09-07]. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.8.024022. ISSN 2331-7019.

<sup>36</sup> LANZAGORTA, Marco. Quantum imaging for underwater arctic navigation. In: *Proc. SPIE* [online]. 10188. 2017, 101880G-27 [cit. 2017-09-07]. DOI: 10.1117/12.2262654.

<sup>37</sup> ZHAO, Ming, Jeffrey UHLMANN, Marco LANZAGORTA, Jayanth KANUGO, Aditya PARASHAR, Oliverio JITRIK a Salvador E. VENEGAS-ANDRACA. Passive ghost imaging using caustics modeling. In: *Proc. SPIE* [online]. 10188. 2017, 101880H-9 [cit. 2017-09-07]. DOI: 10.1117/12.2262656.

Velký potenciál by měl kvantový radar v použití jako radar se syntetickou aperturou (*Synthetic Aperture Radar - SAR*)<sup>38</sup>, k přesnému měření zeměměřeni<sup>39,40</sup> nebo například v geodezii<sup>41</sup>.

## 5. DISKUSE

Dnes již nemá smysl ptát se, jestli kvantové radary budu, ale spíše kdy. S největší pravděpodobností jak v USA, tak i v Číně, mají kvantový radar ve fázi prvotních laboratorních testů. Otázka je, o jak samostatné a efektivní kvantové radary jde, neboť minimálně v oblasti mikrovln nejsou k dostání spolehlivé jedno fotonové zdroje stejně tak jako detektory, které jsou potřebné k plnému využití výhod, které kvantový radar skutečně nabízí.

Je zde také spousta detailů, o kterých nejsou informace, ale vědci, kteří pracují na konkrétních kvantových radarech, je musejí řešit. Například, jaké konkrétní frekvence fotonů použít, jaké je optimální množství fotonů, jaká je ideální konstrukce, jak interpretovat kvantová měření, jak se vyrovnat se šumem a to včetně kvantového, jak bude vypadat QRCS pro reálné makroskopické pohyblivé cíle, jestli lze využít další kvantové vlastnosti a jevy ke zvýšení výkonu a efektivity kvantového radaru atd.

Na druhou stranu, odvětví kvantových technologií zažívá období, kdy se o nich začíná čím dál více mluvit, věnovat jim pozornost a hlavně investovat do kvantových technologií peníze nejen v USA a Číně. Mnohé instituce, země i dokonce EU<sup>42</sup> vypracovávají strategie a tvoří odborné skupiny, které řeknou, na co se zaměřit a jak z toho vytěžit co nejvíce. Kvantové technologie zahrnují namátkou kvantové navigace, přesnější měření času, kvantové zobrazování, bezpečná komunikace a kryptografie či kvantové počítače. Kvantový radar v tomto výčtu spadá pod kvantové zobrazování.

Samostatnou kapitolou je kvantový radarový účinný průřez, kde na jeho výpočet pro makroskopické objekty je potřeba obrovského výkonu. V tomto ohledu mají výhodu v Číně a USA<sup>43</sup>, kteří mají největší počet výpočetních farem, tzv. superpočítačů, které by šly použít pro výpočty komplexnějších cílů. Nicméně, odhad autora je, že první přesnější výsledky pro QRCS pro makroskopické objekty budou pocházet z laboratorních měření.

<sup>38</sup> LANZAGORTA, Marco, Oliverio JITRIK, Jeffrey UHLMANN a Salvador E. VENEGAS-ANDRACA. Quantum synthetic aperture radar. In: *Proc. SPIE* [online]. 10188. 2017, 101880F-11 [cit. 2017-09-07]. DOI: 10.1117/12.2262645.

<sup>39</sup> LANZAGORTA, Marco, Oliverio JITRIK, Jeffrey UHLMANN a Salvador VENEGAS. Quantum seismography. In: *Proc. SPIE* [online]. 98291. 2016, 98291G-25 [cit. 2017-09-07]. DOI: 10.1117/12.2223831.

<sup>40</sup> LANZAGORTA, Marco, Oliverio JITRIK, Jeffrey UHLMANN a Salvador E. VENEGAS-ANDRACA. The Lemur Conjecture. In: *Proc. SPIE* [online]. 10188, 2017, 101880D-12 [cit. 2017-09-07]. DOI: 10.1117/12.2262634.

<sup>41</sup> JITRIK, Oliverio, Marco LANZAGORTA, Jeffrey UHLMANN a Salvador E. VENEGAS-ANDRACA. Quantum geodesy. In: *Proc. SPIE* [online]. 10188. 2017, s. 101880E-11 [cit. 2017-09-07]. DOI: 10.1117/12.2262640.

<sup>42</sup> LEWIS, A. M., M. KRÄMER a M. TRAVAGNIN. Quantum technologies: Implications for European policy - issues for debate. *JRC Science for Policy report* [online]. 2016, (EUR 28103), - [cit. 2017-09-07]. DOI: 10.2788/314355. ISSN 1831-9424.

<sup>43</sup> TOP500 [online]. [cit. 2017-09-15]. Dostupné z: <https://www.top500.org/>

Toto odvětví je velice dynamické a stále přichází s novými objevy a principy. Z toho všeho autor usuzuje, že v následujících 5-10 letech lze očekávat nějaké pokročilejší laboratorní prototypy kvantových radarů, které zároveň již umožní experimentální testování teoretických výpočtů, např. kvantového radarového účinného průřezu. V dalším horizontu 5 let lze očekávat, že se objeví první prototypy mimo laboratoře.

Vzhledem k poměrně velkým výhodám kvantových radarů oproti klasickým radarům se lze ptát, jestli zde bude i nějaký kvantový elektronický boj. Nepochybně, pokud zde bude kvantový radar, bude zde i kvantový elektronický boj. Základní části budou stejné jako pro radar, hlavně detektor jednotlivých fotonů případně i zdroj jednotlivých fotonů pro nějaké sofistikované kvantové klamání. Náročnější bude úloha zpracování dat a objevení signálů kvantového radaru, zvláště pokud se bude jednat o kvantový radar využívající kvantové provázání. V současné době autorovi není známa žádná práce přímo na toto téma. Nicméně v oblasti kvantových sítí a distribuce šifrovacích klíčů již existují popisy, jak na tyto systémy zaútočit, kde některé z těchto principů by se mohly stát inspirací i pro oblast kvantového elektronického boje.

S největší pravděpodobností se s konkrétními návrhy systémů pro kvantový elektronický boj setkáme, až zde budou nějaké funkční prototypy kvantových radarů a budeme konkrétněji vědět, s jakým množstvím fotonů pracují, jaká je jejich přesnost, schopnost zpracování jednotlivých a zároveň všech fotonů, největší slabiny a další.

## SHRNUTÍ A ZÁVĚR

Technologie kvantových radarů je stále otázkou budoucnosti, avšak již ne moc vzdálené. Kvantový radar, jak již z názvu vyplývá, využívá kvantových vlastností jednotlivých fotonů, což přináší řadu výhod oproti klasickým radarům.

Z hlediska teoretického výzkumu, byly definovány tři typy kvantových radarů založených na fyzikálním principu. Každý z těchto typů má své výhody a nevýhody. Také byly představy tři hlavní návrhy, jak by kvantový radar mohl fungovat, kde nejslibněji vypadá kvantová iluminace a případně kvantové homodynní měření. Kvantová iluminace nabízí možnost využití základních dvou výhod a to kvantové provázanosti a využití minimálního počtu fotonů.

Jednou z hlavních výhod kvantových radarů je kvantový radarový účinný průřez. Zde kvantové jevy způsobují velmi vysoký kvantový radarový účinný průřez pro postranní laloky při využití velmi malého počtu fotonů, řádu jednotek. Nebo při použití většího množství fotonů dostáváme podle teoretických výpočtů velmi vysoký kvantový radarový účinný průřez pro hlavní lalok, tzn. čelní odraz. Nárůst je tak velký, že stealth letadla, která spoléhají na velmi malý klasický radarový účinný průřez, již budou pro kvantové radary velmi dobře viditelné.

Dále použití relativně malého množství fotonů v kombinaci s velkým pozadím dělá kvantové radary téměř nelokalizovatelné a v kombinaci s kvantovým provázáním je i značně těžší, až exponenciálně, je rušit klasickými prostředky elektronického boje. Do budoucna lze očekávat, že ruku v ruce s kvantovými radary budou vznikat i kvantové

systémy elektronického boje, které budou působit proti radarům nebo se snažit o jejich lokalizaci.

Za posledních několik let se objevila řada teoretických a experimentálních prací a výsledků ohledně kvantového provázání, průchod fotonů atmosférou, detekce jednotlivých fotonů, interferometrie, analýza signálů kvantových stavů, atd. Rovněž byly identifikovány všechny klíčové komponenty pro vytvoření sofistikovaného kvantového senzoru, to zahrnuje např. rychlé a efektivní zdroj provázaných fotonů v mikrovlnné oblasti, detekce jednotlivých fotonů v mikrovlnné oblasti, detekční metody, zpracování signálu a analýza, sběr dat a protokoly pro potlačení šumu. Všechny tyto nutné technologie jsou v současnosti ve vývoji různými výzkumnými skupinami na celém světě.

---

**O autorovi:** *Ing. Bc. Michal Křelina, Ph.D., narozen 1987, v letech 2007-2016 absolvoval bakalářský, magisterský a doktorský studium oboru Experimentální jaderná fyzika na FJFI ČVUT v Praze. Dále, v letech 2011-2014 absolvoval bakalářské studium Specializace v pedagogice na MÚVS ČVUT v Praze. V současnosti pracuje jako postdoktorský výzkumný pracovník na Universidad Técnica Federico Santa Maria ve Valparaíso, Chile a částečně na FJFI ČVUT v Praze, kde se věnuje teoretické jaderné fyzice vysokých energií. Kromě teoretického výzkumu v jaderné fyzice se ve volném čase zabývá elektronickým bojem, kvantovými technologiemi a jejich aplikací ve vojenství.*

---

**Jak citovat:** KŘELINA, Michal. Kvantový radar – principy a perspektiva. *Vojenské rozhledy*. 2017, 26 (4), 99-118. ISSN 1210-3292 (print), 2336-2995 (on-line). Available at: [www.vojenskerozhledy.cz](http://www.vojenskerozhledy.cz)