

Technologické, vědecké a ekonomické příležitosti pro Českou republiku v oblasti zlomových laserových technologií ve vesmíru

Petr Boháček

Institut politologických studií, Fakulta sociálních věd Karlovy Univerzity

Výsledek projektu: 10c

VERZE V1.1

10c - interakce průmyslových - v1.1



This report was supported by the Technological Agency of the Czech Republic. Particularly through a scientific grant TACR TL01000181: "A multidisciplinary analysis of planetary defense from asteroids as the key national policy ensuring further flourishing and prosperity of humankind both on Earth and in Space."

Souhrn	3
Úvod	4
Laserové kosmické aplikace	4
Současný stav a vycházející příležitosti	5
Řízení kosmického provozu	5
Narůstající poptávka	5
Komeracionalizace STM	7
Role soukromého sektoru	8
Těžba ve vesmíru	10
Příležitost pro ČR	10
Zahraničně-bezpečnostní rozměr	12
Laserový instrument pro smetí a suroviny	12
Vývoj laseru	13
Palubní požadavky	14
Závěr	16



This report was supported by the Technological Agency of the Czech Republic. Particularly through a scientific grant TACR TL01000181: "A multidisciplinary analysis of planetary defense from asteroids as the key national policy ensuring further flourishing and prosperity of humankind both on Earth and in Space."

Souhrn

- Česká republika má enormní potenciál a odkaz v oblasti laserových technologií a jejich využití ve vesmíru od světelného plachtění, po prospekci nebeských těles až po zabezpečení kosmického provozu. K udržení existujících kapacit a naplnění jejich potenciálu je ale potřebná stabilní systematická podpora ze strany státu.
- Velké investice do rozvoje takových aplikací ale nejsou pro ČR z politického ale i ekonomického hlediska obhajitelné ani nezbytné. Přesně zacílená a dlouhodobá strategie reagující na aktuální trendy v oblasti kosmických technologií může být efektivním a málo nákladným způsobem pro dosažení vysoké hospodářské návratnosti a politického a bezpečnostního přínosu.
- ČR může využít sílíci komercializace kosmického sektoru v oblastech, ve kterých budou laserové technologie velkým přínosem. Mezi takové oblasti patří zabezpečení kosmického provozu a těžba ve vesmíru, jelikož jejich exponenciální rozvoj představuje i exponenciální rozvoj komerčních příležitostí pro české kapacity.
- Efektivním a jednoduchým krokem, který může na růst těchto nových sektorů reagovat, je vývoj laserového instrumentu pro kosmickou sondu s využitím pro sledování objektů na oběžné dráze, odklánění kosmického smetí ablací a dálkové ablační prospekce laserem buzeného plazmatu.
- Rozvoj takové technologie nejdříve vyžaduje přímou podporu pro robustní modelování interakce laserových paprsků s materiály kosmické tříště a nebeského (zejména měsíčního) povrchu tak i celého optického zařízení pro tyto účely. Na základě takového základního výzkumu lze rozvinout patentovanou ablační metodu a parametrizovat laserový instrument a jeho palubní požadavky s cílem odklonu kosmického smetí a dálkové prospekce.
- S ohledem na rostoucí komerční zájem, zejména po zabezpečení kosmického provozu, lze očekávat významnou poptávku po takových metodách, studiích a instrumentech. Česká republika tak může malou ale chytře cílenou podporou vytvářet komerčně hodnotné inovace v oblasti kosmických technologií a podpořit rozvoj laserových aplikací ve vesmíru.



This report was supported by the Technological Agency of the Czech Republic. Particularly through a scientific grant TACR TL01000181: "A multidisciplinary analysis of planetary defense from asteroids as the key national policy ensuring further flourishing and prosperity of humankind both on Earth and in Space."

Úvod

Laserové technologie patří mezi jedny z největších vědeckých odkazů a národních specialit České republiky. Jejich kosmické aplikace představují potenciál pro specifickou technologickou niku ČR ve vesmíru. Mezi tyto oblasti patří využití laserů pro sledování provozu na oběžné dráze a odstraňování kosmické tříště, prospekci povrchu na jiných nebeských tělesech (planetách a asteroidech) za účelem těžby či planetární obrany a rozvoj světelného plachtění.

Pro rozvoj laserových kosmických aplikací jako národní niky existuje řada důvodů na národohospodářské, bezpečnostní či zahraničněpolitické rovině. Z národohospodářské roviny jde o investici, která bude mít za efekt udržení špičkových kapacit a tradičního vědeckého odkazu ČR v oblasti laserových technologií jako takových i jejich aplikací ve vesmíru, ale také naplnění jejich plného potenciálu. To se odrazí v průmyslových oblastech s přidanou hodnotou v souladu s nutným odklonem od českého hospodářství jako montovny zahraničních technologií k mozkově nových a vlastních inovací. Dalším benefitem je podpora existujících vědecko-výzkumných kapacit a to zejména zajištění personálních zdrojů (výchova nových a udržení a rozvoj stávajících vědeckých pracovníků).

V některých oblastech využívání laserů ve vesmíru je český vědecko-průmyslový sektor již částečně zapojen (sledování objektů na oběžné dráze). Jedná se sice o špičkové ale pouze dílčí kapacity. Plné naplnění tohoto potenciálu vyžaduje jasně deklarovanou a dlouhodobě systematickou strategii. Tento souhrn představuje konkrétní kroky a cestu, jak začít o takové podpoře systematicky uvažovat, a jejich předkládá také racionalizaci takové podpory.

Laserové kosmické aplikace

Využití laserových technologií ve vesmíru je celá řada. Jejich potenciál byl shrnut a představen v rámci mezinárodní konference Prague Laser SpaceApps Workshop v roce 2019, která přivítala desítky špičkových fyziků z celého světa.¹ V rámci tohoto workshopu byly identifikovány tři hlavní klastry zahrnující průzkum vesmíru, prospekci nebeských těles a zabezpečení kosmického provozu.²

Nejambicióznější ale zároveň futuristickou aplikací je využití laserového pozemního pole jako fotonového pohon pro světelné plachtění malých nanosond s potenciálem dosažení jedné pětiny rychlosti světla.³ I když aktivně rozvíjený organizací Breakthrough Initiatives, takový scénář je stále až

¹ Souhrn Laser SpaceApps Workshop lze nalézt na http://lasers4space.com/wp-content/uploads/2020/01/Laser-SpaceApps-Workshop-2019_Summary-Report.pdf

² Daniel Jakeš, „Silný laser by mohl sondy urychlit až na 20 % rychlosti světla“, Akademie věd ČR, 4. číjna 2019, <http://www.avcr.cz/cs/veda-a-vyzkum/aktuality/Silny-laser-by-mohl-sondy-urychlit-azna-20-rychlosti-svetla/>.

³ N. Kulkarni, P. Lubin, Q. Zhang, Relativistic Spacecraft Propelled by Directed Energy, Astron. J.



desítky let vzdálen. O trochu bližší je využití laserů umístěných ve vesmíru pro odklon nebezpečných asteroidů pomocí fotonického tlaku či ablace.⁴ Limity současného poznání a nedostupnost laserových diod, optiky, zdrojů energie či tepelného managementu jsou ale překážkou pro realizaci takových velkých plánů. I přesto je jejich rozvoj žádoucí.

Vedle těchto vzdálených aplikací ale existují oblasti, kde jsou tyto laserové instrumenty již rozvinuty a používány. Patří sem prospekce materiálů či sledování a odklon kosmického smetí, jako široce využívané aplikace, jejichž rozvoj je pro Českou republiku žádoucí z hlediska rozvoje vlastního kosmického průmyslu, ale také z politického a bezpečnostního hlediska. Tyto metody fungují víceméně na stejné bázi a jejich vývoj a rozvoj tak přímo přispívá k dosažení výše zmíněných futuristických žádoucích aplikací. Z toho vychází pak celá logika rozvoje dosažitelných kosmických laserových instrumentů s cílem rozvoje i těchto vzdálenějších aplikací.

Současný stav a vycházející příležitosti

Jako dvě nejdosažitelnější a nejrelevantnější oblasti pro aplikaci kosmických laserových technologií jsou oblasti řízení kosmického provozu (zejména na oběžné dráze) a oblast využívání nerostných surovin ve vesmíru. Tyto oblasti mají velký komerční potenciál díky kterému i relativně malá ale strategicky plánovaná snaha a podpora ze strany českých veřejných institucí může vést k velkému ekonomickému, vědeckému, politickému, bezpečnostnímu a celospolečenskému přínosu.

Řízení kosmického provozu

Sektor řízení kosmického provozu (Space Traffic Management, STM) zahrnuje mimo sledování kosmického provozu (Space Tracking and Surveillance) jako poddomény kosmické bezpečnosti (Situational Space Awareness, SSA) také aktivní odstraňování kosmického smetí. Patří sem tedy nejen pasivní ale i aktivní nástroje.

Narůstající poptávka

Hlavním rysem této domény, která musí být brána v potaz při hledání příležitostí pro český kosmický sektor, je narůstající poptávka po službách STM a jejich komercializace. Ty jsou výsledkem rostoucí satelitní ekonomiky a počtu objektů na oběžné dráze. Hlavním zdrojem tržního růstu je pak sektor satelitní komunikace, která představuje trh o objemu 153 miliard USD a který je z 21% tlačen

155 (2018) 155. <https://doi.org/10.3847/1538-3881/aaafd2>. & C.R. Phipps, C. Bonnal, F. Masson, M. Boustie, L. Berthe, M. Schneider, S. Baton, E. Brambrink, J.M. Chevalier, L. Videau, S.A.E. Boyer, Transfers from Earth to LEO and LEO to interplanetary space using lasers, *Acta Astronaut.* 146 (2018) 92–102.

<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.02.018>. & K.L.G. Parkin, The Breakthrough Starshot system model, *Acta Astronaut.* 152 (2018) 370–384. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.08.035>.

⁴ P. Lubin, G.B. Hughes, M. Eskenazi, K. Kosmo, I.E. Johansson, J. Griswold, M. Pryor, H. O'Neill, P. Meinhold, J. Suen, J. Riley, Q. Zhang, K. Walsh, C. Melis, M. Kangas, C. Motta, T. Brashears, Directed energy missions for planetary defense, *Adv. Sp. Res.* 58 (2016) 1093–1116.

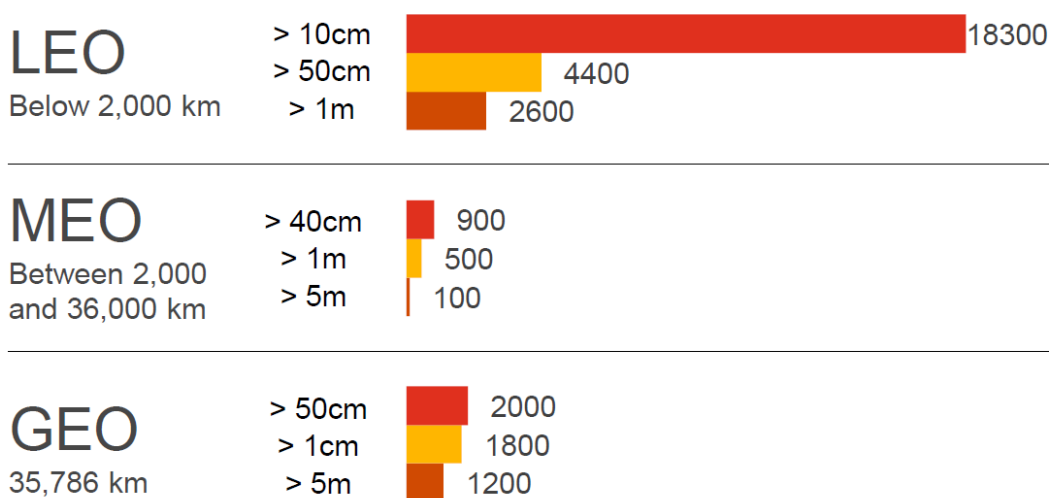
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.05.021>. & Q. Zhang, P.M. Lubin, G.B. Hughes, Orbital Deflection of Comets by Directed Energy, *Astron. J.* 157 (2019) 201. <https://doi.org/10.3847/1538-3881/ab13a5>. & Q. Zhang, K.J. Walsh, C. Melis, G.B. Hughes, P.M. Lubin, Orbital Simulations on Deflecting Near-Earth Objects by Directed Energy, *Publ. Astron. Soc. Pacific.* 128 (2016) 045001.

<https://doi.org/10.1088/1538-3873/128/962/045001>.



poptávkou po službách jako je IoT/M2M či 5G. S tak velkým komerčním zájmem ale samozřejmě roste i počet objektů a větší potřeba po službách STM.

Odhady očekávaného nárůst počtu objektů na oběžné dráze se různí, ale shodují se v jeho exponenciální povaze. Minulý rok předpověděla studie MIT Technology Review, že množství satelitů na oběžné dráze se během dalších 10 let zpětinásobí tedy ze současných cca 3 tisíc na 15 tisíc. Jiné studie očekávají množství že do roku 2025 bude množství družic na oběžné dráze mezi 10 až 15 tisíci. Model organizace Space Safety Coalition, která sdružuje státní a nestátní operátory satelitů, odhaduje, že do roku 2029 bude na oběžné dráze v různých pásmech 107,641 satelitů a 68 velkých konstelací, kde 90 % družic budou vlastnit jen čtyři operátoři. Současně model odhaduje 2,5 milionů nebezpečně blízkých průletů mezi satelity a 40 kolizí ročně.⁵ Výsledkem tak bude velké množství další kosmické tříště vyžadující úklid. A zatímco většina satelitů má schopnosti se vyhnou srážce s dalším objektem, narůstajícím rizikem budou srážky mezi samotným neovladatelným kosmickým smetím.



Obrázek 1: Distribuce kosmického smetí dle domény. Zdroj: PwC

Poptávka po službách STM je dána nárůstem množství družic na oběžné dráze. Prostorově se může zdát, že oběžné dráhy kolem Země v různých výškách od stovek po desetitisíce kilometrů na povrchem jsou těžce vyčerpatelné. Omezení sektoru STM ale nedefinuje prostor, nýbrž kapacity STM všech participujících aktérů předcházet kolizím. V současné době přesahuje množství varování před kolizemi kapacity operátorů STM a tento problém bude narůstat. Jde zde nejen o kapacity zpracovávání velkého množství dat a jejich analýzy ale také dostatečně rychlé ověřování varování o potenciálních kolizích, které zahrnuje sektor STM.

Slabým článkem současného systému je ale zejména nepřesnost v určování orbitů družic a kosmického smetí. Nepřesná data stojí za velkým množstvím varování před možnou kolizí se kterými se operátoři musí vypořádat, což zvyšuje riziko, že pod tíhou falešných varování nestihnou zpracovat ty opravdové a kolizi se vyhnout. Bez zpřesnění těchto primárních dat pak nelze očekávat, že kapacity STM budou

⁵ Daniel L. Oltrogge, Space Safety Coalition <https://swfound.org/media/207058/sda-event-transcript-final.pdf>



This report was supported by the Technological Agency of the Czech Republic. Particularly through a scientific grant TACR TL01000181: "A multidisciplinary analysis of planetary defense from asteroids as the key national policy ensuring further flourishing and prosperity of humankind both on Earth and in Space."

schopny reagovat na exponenciální růst družic a tím i množství varování před srážkami.⁶ Nedostatek přesných dat o jednotlivých objektech také vychází z nedostatečného sdílení dat ze strany operátorů. Proto lze očekávat nárůst poptávky nejen po dalších senzorech, které doplní ty současné, ale také po přesnějších senzorech s cílem zpřesnění oběžných drah a snížení množství falešných upozornění potenciální kolize.

Klíčovou proměnou je intenzita mezinárodní spolupráce ve sdílení dat pro zabezpečení této domény. V tomto ohledu je ale na místě určitá míra skepse, jelikož potřeba sdílení dat napříč všemi kosmickými aktéry, ať už vojenskými, státními či komerčními, neodpovídá motivaci tyto data sdílet, ať už z národně-bezpečnostních, technických či čistě komerčně-konkurenčních důvodů. Proto je na místě předpokládat, že také kvůli absenci kompletního vzájemného sdílení dat bude důležitost vlastních ale i dílčích kapacit a služeb v oblasti STM narůstat.

Bez fúze STM dat na globální rovině bude potřeba řady různých sensorů ale zejména různých modelů pro vypočítávání drah, předpovídání kolizí objektů na oběžné dráze a zjištění celkového stavu kosmického provozu. Využívání řady různých modelů, které poskytnou rozdílné ale komplementární a překrývající se pohledy na stav kosmického provozu, je způsobem, jak řešit nedostatek kompletních globálních dat, zvyšovat celkovou výslednou preciznost všech sensorů a zajistit přesnější obrázek o celé doméně. Takový přístup se dá připodobnit ke sledování počasí, kde komplexní meteorologické předpovědi jsou výsledkem několika vzájemně se doplňujících modelů z různých zdrojů. Dalším komplikujícím faktorem pro modelování stavu kosmické domény, a tím pádem pro vypořádávání se s problémem nárůstu megakonstelací, jsou technologie používané pro nové generace satelitů. Ty ve většině využívají nové typy nízkotahových pohonů či změn vlastních oběžných drah pomocí metody diferenciálního odporu (*differential drag*). Díky nim jsou současné modely pro sledování kosmického provozu nejen neefektivní ale mnohdy i nevhodné. O to víc bude pro zajištění základních služeb STM potřeba pracovat s několika komplementárními modely a sensory.

Komeracionalizace STM

V tomto kontextu je ale nutné zopakovat hlavní současný trend kosmického sektoru, a to jeho zvyšující se komercializaci, která se týká také sledování a zabezpečování kosmického provozu. Zatímco například v Evropě jsou téměř výhradním operátorem a vlastníkem přímo státní či státem placené instituce (armáda, vědecké instituce), tak ve Spojených státech je segment STM silně komercializovaný a samy soukromé společnosti vlastní a operují nejen pozemní a kosmické sensory na sledování provozu, ale obstarávají kompletní integrovaný balíček služeb STM. Tam patří různé části celého procesu STM. Ten začíná poskytováním „hrubých“ dat sensorů (data provision), software na katalogizaci a správu dat (database management), softwarové nástroje pro vyhodnocování dat včetně upozorňování před kolizemi (software analysis) až nakonec po operační zajišťování satelitů a vyhýbání se kolizím.

Space Policy Directive – 3, tedy třetí kosmická direktiva administrativy Donalda Trumpa zveřejněná v roce 2018, je zaměřená na podporu rozvoje komerčního sektoru STM s cílem zefektivnit tento

⁶ Dle předsedy Space Data Association Pascal Wauthiera. Tento nedostatek uvedl například na události Safety of Spaceflight: Looking Back at the Past Decade, Looking Ahead at the Next Five Years pořádané Secure World Foundation 29. července 2020. (<https://swfound.org/media/207058/sda-event-transcript-final.pdf>)



segment pomocí soukromých aktérů a tak zajistit podobně jako program na rozvoj soukromých raketových služeb COTS svou pokračující technologickou dominanci ve vesmíru. Stát je v USA jak přímým tak nepřímým investorem, který přímo platí rozvoj nových sensorů, ale také který platí komerčním aktérům za dodaná SST data. Zároveň Ministerstvo obchodu, jako hlavní entita spravující segment STM, poskytuje zdarma široký katalog všech objektů. Otevřená data jsou pak k dispozici všem aktérům, i těm komerčním, kteří je využívají k nabídce dalších služeb v řetězci, tedy vlastních a více sofistikovaných produktů pro operátory satelitů.

EU takovou politiku v oblasti STM zatím nemá. Některé členské státy platí komerčním subjektům za SST, ale v rámci služby EU SST nejsou volně k dispozici data, nýbrž pouze základní tři poskytované služby (sledování úlomků, analýza návratu objektů, vyvarování se kolizím). Zanedbatelně malý příspěvek do EU SST v hodnotě 0,4 miliard EUR v rámci Víceletého finančního rámce 2021-2027 přichází s pochybami o naplnění ambic EU SST, které tak jako tak jsou s porovnáním výše popsané povahy sektoru STM nedostačující. EU SST očekává do roku 2021 na LEO pokrytí 35% všech objektů větších než 10 cm a do roku 2028 65%. Takový stav nelze vnímat jako dostatečný. Zde je ale zásadní podtrhnout výchozí podstatu EU SST a to, že má sloužit pouze jako podpůrný rámec. I proto Evropská rada v listopadu 2020 ve svém prohlášení zdůraznila potřebu koordinovaného evropského přístupu k STM a vyzvala všechny kompetentní aktéry, akademický a průmyslový sektor, k zahájení dialogu ke zmapování existujícího regulatorního rámce.⁷

V situaci kdy nelze považovat existující institucionální zabezpečení segmentu STM ze strany evropského veřejného sektoru za dostačující výše popsané dynamice, tedy exponenciálnímu nárůstu nároku na zabezpečení satelitů na oběžné dráze, je pouze otázkou času kdy začne tuto mezeru zaplňovat právě soukromý sektor i v Evropě. Evropa disponuje základními technologickými kapacitami, které mohou být solidním základem pro rozvoj komerčních služeb STM. Po vzoru amerického přístupu může soukromý sektor zaplnit mezeru v nezbytných kosmických schopnostech, které samostatný stát není schopný spravovat ve své plné potřebné míře, podobně jako segment raketových nosičů či zpracovávání surovin ve vesmíru. Pro samostatné fungování ale soukromý sektor musí mít dostatečně rozvinuté vědecko-technické základy na kterých soukromý sektor může stavět. Je tak otázkou, zdali v evropských podmínkách existuje dostatečně robustní vědecko-technické zázemí na rovině budování a servisu sensorů, zpracovávání dat a dalších segmentů STM, aby mohl dát vzniknout komerčnímu produktu, který by byl konkurenceschopný.

Role soukromého sektoru

Podobně jako Spojené státy pomalu kompletně přenechaly segment raketových nosičů soukromému sektoru se s rostoucí náročností a neschopností veřejného sektoru držet krok s technologickým rozvojem může hlavní podíl služeb STM při nárůstu jejich náročnosti v rukou komerčních aktérů. Zde je důležité podtrhnout očekávatelné trendy v této poptávce, které se ale liší dle segmentu a aktéra. Komerčně jsou na americkém trhu dostupné nejen jednotlivé prvky (sensory, instrumenty, software) ale celé služby (upozorňování na možné kolize, samotné vyvarování se kolizím, zabezpečování satelitů). Takzvaný *off-the-shelf* přístup, tedy dostupnost klíčových hardwarových i softwarových nástrojů na trhu tak platí i pro služby v oblasti STM. Produkty lze dělit na primární a sekundární. Mezi

⁷ European Council, „Orientations on the European contribution in establishing key principles for the global space economy“, 11. listopadu 2020.



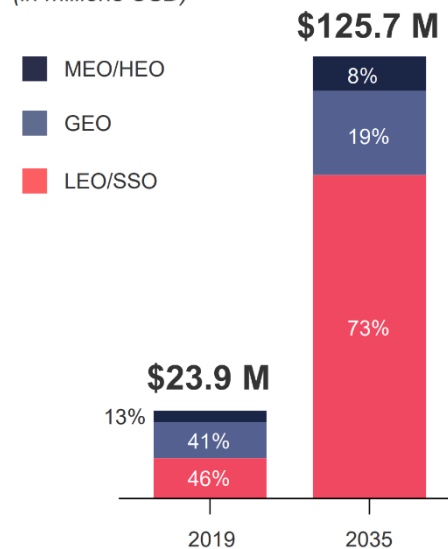
primární produkty patří obyčejná data z jednotlivých sensorů, která si platí vládní agentury pro vylepšení vlastních katalogů a databází. Sekundární služby staví na těchto veřejně dostupných datech těchto katalogů a rozvíjejí je do komplexních služeb STM. Zatímco primární služby vyžadují buď velké investice do rozvoje technologického základu nebo přímou veřejnou zakázku na nákup výsledných dat. Model ze kterého vznikají sekundární služby pak lze připodobnit k modelu systémů Galileo a Copernicus, kde tyto veřejně placené družicové platformy poskytují zdarma a volně dostupné data ze kterých vznikají nové komerční služby.

Z výše popsané stoupající náročnosti bude v dalších letech významně růst nejen celková poptávka ale i robustnější požadavky na komplexní služby STM, a to jak ze strany veřejného tak komerčního sektoru. Pro soukromý sektor STM v současnosti představují komerční příjmy v porovnání s příjmy od státních aktérů pouhou čtvrtinu (státní poptávka představuje 80 % z celkového tržního objemu STM o hodnotě 23.9 milionů USD).⁸ Soukromý sektor je tak zejména zdrojem dat. Jejich nákup od komerčních subjektů je ale také investicí do rozvoje komerčního sektoru STM. Výše zmíněné trendy dle odhadů navíc povedou k nárůstu celé tržní hodnoty STM na 125.7 milionů USD do roku 2035 a změny poměru mezi komerční a státní poptávkou na 2:3, což představuje desetinásobný růst komerčního trhu STM.

Komerční příležitosti pro soukromý sektor se liší dle uživatelů ale také segmentů oběžné dráhy. Státní agentury jako v současnosti hlavní klienti jsou mnohem více zaměřeny na jednotlivé velké satelity, které jsou dražší, komplexnější a tak s nimi přirozeně přichází větší důraz na jejich zabezpečení. Nicméně, většinou se vyskytují na geostacionární oběžné dráze, která je vnímána jako mnohem zabezpečenější a s menším nárůstem nových objektů. Na geostacionární dráze také operují velké komunikační satelity, které mohou mít velkou důležitost pro jednotlivé komerční subjekty, ale na jejich ochranu dostačují dostupná SST data. Konstelace či mega-konstelace se vyskytují na nízké oběžné dráze a jsou doménou soukromých firem a inovativních start-upů. Zatímco tento segment se vyznačuje mnohem menší motivací investovat do zabezpečení menších satelitů, tak je zároveň zabezpečování na této dráze mnohem náročnější a exponenciální nárůst objektů bude tuto potřebu katapultovat vzhůru.

Jasným jednotným trendem ale bude potřeba přesnějších dat s cílem zajištění menší chybovosti varování před kolizemi, už jen kvůli exponenciálnímu nárůstu objektů. K tomu ale mohou různí aktéři přistupovat rozdílně. Taková potřeba může být uspokojena novými a přesnějšími sensory, zejména laserovými, pro upřesnění dat, která budou poptávat jak samotní satelitní operátoři, správci národních katalogů či správci megakonstelací. Dalším způsobem naplnění takové poptávky může být vytvoření ochranných instrumentů pro jednotlivé velké satelity, které budou samy o sobě schopny

Market value by orbit
(in millions USD)



Obrázek 2: Tržní hodnota služeb STM dle typu oběžné dráhy. Zdroj: Euroconsult.

⁸ Euroconsult Report. Commercial Space Surveillance and Tracking. March 2020.



This report was supported by the Technological Agency of the Czech Republic. Particularly through a scientific grant TACR TL01000181: "A multidisciplinary analysis of planetary defense from asteroids as the key national policy ensuring further flourishing and prosperity of humankind both on Earth and in Space."

nebezpečné úlomky v konkrétních oblastech odklonit. Lepší data o oběžných drahách satelitů se efektivně stanou velmi dobře ohodnoceným produktem a více sensorů bude sloužit pro vzájemnou kalibraci. Stejně tak nové ochranné instrumenty pro případ, že systém STM nebude fungovat stoprocentně.

Investice státu do takovýchto technologií pak může vytvořit jak primární tak sekundární služby. Stejně tak přesně zaměřená podpora základního výzkumu může vést ke komerčně vysoce hodnotnému poznání, které přiláká investory či na něm bude moci komerční aktivita stavět. Příkladem je australská observatoř na Mt. Stromlo, jejichž vědeckého základu historické observační stanice pak mohla využít soukromá firma pro vývoj inovativního produktu pro ničení kosmického smetí australské zbrojařské firmě Electro Optical Systems (ASX: EOS). Tomu přispěly i vědecké kapacity ČR, které nepřímo pomohly vývoji nového komerčního nástroje. Podobný příkladem je vývoj satelitu pro ničení kosmického smetí velkou japonskou mediální a komunikační firmou Sky Perfect JSAT. Jako firma pro kterou jsou jejich komunikační satelity nepostradatelným prvkem podnikání si uvědomuje rizika kosmického provozu a proto se rozhodla vyvíjet takovou kapacitu ve spolupráci s JAXA a státními výzkumnými institucemi.

Česká republika disponuje kapacitami vytvořit komplexní produkt pro oblast STM, který bude žádaný a přínosný, jelikož bude poptávka pro diverzitu sensorů a dat. To ale vyžaduje přesně zaměřenou a dlouhodobou strategii podpory kosmického výzkumu a průmyslu v oblastech s velkým inovačním potenciálem a budoucností jako je zabezpečení kosmického provozu a těžba ve vesmíru.

Těžba ve vesmíru

K druhému zmíněnému tématu se podrobně věnuje studie *Technologický, vědecký a ekonomický dopad na ČR v oblasti těžby ve vesmíru*, a proto je v této části jen krátce shrnut. V sektoru těžby ve vesmíru je určujícím nedostatečné vědecké poznání v řadě oblastí. Patří sem malá znalost chemických a fyzických vlastností nebeských těles, což zamezuje jak upřesnění potenciálních surovin pro těžbu, ale také konkrétních metod pro jejich získávání, zpracování a využívání. A zatímco kyslík či voda jako zdroje paliva představují ten největší potenciál v oblasti těžby na Měsíci, vysoké náklady na robustní zmapování přesné kvality a kvantity těchto surovin a nutné testování a vývoj hlavních i dílčích kapacit pro kompletní zpracování těchto surovin přímo na Měsíci (takzvaná *ground truth*) značně omezují rozvoj tohoto segmentu. Na základě této dynamiky se jako dlouhodobě perspektivní sektor jeví prospekce surovin či rozšíření již otestovaných a pokročilých technologií na zpracovávání vodíku a kyslíku. V souhrnu by se ČR v této oblasti měla zaměřovat na tvorbu vlastních instrumentů pro prospekci surovin, včetně laserového osvětlování a laserem buzené spektroskopie plazmatu, ale také zapojením se a rozšířením metod zpracovávání surovin ve vesmíru pomocí laserových instrumentů.

Příležitost pro ČR

Česká republika nedisponuje velkým politickým a finančním kapitálem na masivní investice do vysoce sofistikovaných a z hlediska hlavních sektorů českého kosmického průmyslu okrajových oblastí kosmických aktivit jako je těžba ve vesmíru, zabezpečování kosmického provozu či vývoj inovativních pohonů. Může však precizně svou malou podporu zaměřit způsobem, které staví na již existujících vědeckých špičkových kapacitách naší země v jiných oborech, na jejich komerčním potenciálu a multifunkčním uplatněním a trendech celém kosmickém sektoru. ČR je do oblasti zabezpečení kosmického provozu zapojena pouze dílčími kapacitami, jejichž dlouhodobá udržitelnost je finančně



This report was supported by the Technological Agency of the Czech Republic. Particularly through a scientific grant TACR TL01000181: "A multidisciplinary analysis of planetary defense from asteroids as the key national policy ensuring further flourishing and prosperity of humankind both on Earth and in Space."

nákladná a přínos pro budoucí rozvoj kosmického průmyslu je diskutabilní. Právě proto zaměřujeme pozornost na oblast využití laserových nástrojů pro STM.

Zapojení ČR to sektoru STM by mělo ale vycházet a) z trendů sektoru STM, a b) praktické roviny udržitelnosti a přínosů takového zapojení. V první rovině bude narůstající množství objektů na oběžné dráze vyžadovat zejména preciznější a aktuálnější data trajektorií jednotlivých objektů pro snížení počtu falešných varování. Vzhledem k očekávané nedostatečné propojenosti dat a katalogů všech aktéru STM pak bude každý sensor přidanou hodnotou. Komerční soutěž se tak pravděpodobně bude odehrávat v oblasti inovativnosti a různorodosti sensorů pro preciznější data a komplementární modely. Vedle toho trendu také stojí očekávaný nárůst kolizí na nízké oběžné dráze, kde kolize mezi nekontrolovatelnými objekty, zejména tedy kosmickou tříští, bude narůstající problém. Právě pro řešení těchto problémy jsou přímo využitelné laserové technologie.

Česká republika není z hlediska existujících laserových sensorů v Evropě, konkrétně pak v sousedícím Polsku, Rakousku a Německu, ale ani z hlediska oblačného počasí vhodným místem pro laserovou stanici ke sledování satelitů a kosmického smetí (SLR). Jednou z možností je navázání historické mezinárodní spolupráce na stavbě SLR stanice v egyptském Helwanu k jejímu rozvoji. Takové řešení ale má řadu překážek. Narozdíl od minulosti chybí vhodná mezinárodněpolitická konstelace. Navíc technologický stav helwanské stanice ani místní podnebí nejsou pro takový projekt ideální a jak samostatná síť evropských laserových stanic tak jejich partnerských institucí po celém světě nabízí dostatečné globální pokrytí.⁹ Další překážkou je absence dostatečných technologických kapacit takovou stanici zabezpečit, která by vedla k nutnému vybavení takového pracoviště na pár výjimek zahraničními technologiemi. Navíc pro pracoviště profesora Procházky, které je již nyní intenzivně zapojeno do těchto snah v rámci Evropské kosmické agentury ale i dalších mimo-evropských institucí, by takový národní projekt odváděl kapacity od smysluplnějších a efektivnějších mezinárodních aktivit. Z hlediska ekonomického by náklady takového řešení přesahovaly jeho dlouhodobé přínosy.

Řešením které odpovídá potřebě segmentu STM ale také českých kapacitám a adekvátní udržitelnosti a návratnosti takové investice je rozvoj vlastního laserového instrumentu pro sledování objektů ale i jejich manévrování ve vesmíru. Využití takového instrumentu nemusí přitom být pouze jako samostatný sensor pro sledování, identifikaci a katalogizaci kosmické tříště a všech objektů, ale také jako malý instrument na satelitech pro jejich vlastní charakterizaci a případné vyhnutí před kolizí s úlomkem. To může být zajímavé pro komerční aktéry, kteří a) dodávají čistá data pro státní agentury (členské státy zapojené do EU SST či Ministerstvo obchodu USA), b) využívají volně poskytnutá data pro tvorbu sofistikovanějších služeb STM vyžadující zpřesnění dat (modelace scénářů kosmického provozu, řešení varování před kolizemi), či c) sami vlastní a operují několik nákladných a nepostradatelných komunikačních satelitů a mají vůli investovat do jejich ochrany. Pro státní sektor podpora takových služeb může být atraktivní, jelikož vytvoří nejen potřebné nástroje pro zlepšení zabezpečení satelitních systémů, ale také vytvoří kapacity s komerčním užitím.

Takový instrument je také přímo využitelný pro výše zmíněnou aplikaci pro těžbu ve vesmíru, a to jak prospekci tak zpracovávání materiálu. Cílená a systematická podpora pro kosmický průmysl by se měla

⁹ Plně funkční evropskou síť laserových stanic pro sledování ale i manévrování s kosmickou tříští vyhodnocuje projekt ESA LARAMOTIONS.



zaměřovat na ty segmenty, ve kterých soukromý sektor není schopný samostatně fungovat a které zapadají do dlouhodobé strategie rozvoje kosmických kapacity do kterých stát chce aby se jeho ekonomika zapojovala. I přesto, že kapacity dělat komplexní kosmické projekty v ČR jsou, není dostatek projektových a manažerských kapacit nové projekty rozvinout, získat financování a podporu a uřídit.

Zahraničně-bezpečnostní rozměr

Tuto příležitost je nutné také vnímat ve svém zahraničně-politickém rozměru. První rovinou je bezpečnostní dimenze takového projektu, tedy nutnost ochrany družicových systému jako klíčových prvků civilní kritické infrastruktury. Ze své podstaty Česká republika není schopna takový cíl zajistit sama a závisí na bezpečnostní spolupráci v EU a NATO. Aby se ČR vyvarovala černého pasažérství, jako jedné z hlavních zahraničně-politických slabostí české bezpečnostní politiky, měla by přispívat do unijních a aliančních struktur způsobem adekvátním nejen své ekonomické a technologickému potenciálu, ale také kosmickým ambicím ČR a její důležitosti pro evropský kosmický segment daným pražským sídlem EUSPA.

Dle českého Národního kosmického plánu 2020-2025 mají kosmické aktivity zásadní význam pro nezávislost, bezpečnost a prosperitu Evropy a umožňují řídicím složkám státu reagovat na kritické bezpečnostní výzvy.¹⁰ Družicové technologie nepostradatelné pro hospodářský růst a díky vysokému inovačnímu potenciálu prvkem ekonomické stability. Z vojenského hlediska jsou satelitní technologie díky různým radarovým, optickým, infračerveným sensorům pro pozorování Země klíčové nejen pro oblast zpravodajství, sledování, zaměření cíle, průzkumnictví, ale také pro základní komunikaci a celkovou funkčnost moderní armády. Narůstající závislost na satelitních technologiích je důvodem pro militarizaci prostoru oběžné dráhy, která je ospravedlňována ochranou kritické kosmické infrastruktury. Výsledkem je ale typické bezpečnostní dilema projevující se větším vesmírným zbrojením všech a i snižujícím se zabezpečením.

Budování laserového instrumentu pro sledování kosmického provozu a manévrování s nebezpečným kosmickým smetím má bezpečnostní přínos na dvou rovinách. Zaprvé signifikantně zvýší možnosti sledování kosmického provozu, čímž zvýší jeho transparentnost a také dodržování bezpečnostních pravidel na oběžné dráze. Dvojí využití takové civilní technologie pak v případě konfliktu může být nástrojem pro ochranu vlastních družic pomoci krátkodobého oslepení optických instrumentů možných útočných satelitů.¹¹

Konkrétní potřebné kroky směrem k vývoji takového instrumentu popisuje další část tohoto dokumentu.

Laserový instrument pro smetí a suroviny

Budování laserového instrumentu vyžaduje nejen náročný vývoj v oblasti interakce laseru a kosmických objektů, ale také komplexní integraci takového instrumentu pro kosmickou misi,

¹⁰ „Národní kosmický plán 2020-2025“, Ministerstvo dopravy. <https://www.czechspaceportal.cz/narodni-strategie/narodni-kosmicky-plan/>.

¹¹ S. Korea works on technologies to track military satellites with laser, <https://www.ajudaily.com/view/20210127113624828>



komunikaci s ním a zpracovávání jeho dat. Hlavními výzvy pro vývoj takového instrumentu tento text dělí mezi samotný vývoj laseru a poté definice palubních požadavků pro jeho použití ve vesmíru.

Vývoj laseru

Existující pozemní kontinuální (CW) lasery využívané pro manévrování tříště mají v čase konstantní výstupní výkon za účelem přenosu kinetické energie tak velký, že objekt při průletu zpomalí a propadne atmosférou. Přenos energie CW lasery je také zkoumanou metodou pro světelné plachtění. Nicméně, laserovou specializací ČR jsou ale spíše pulzní lasery. Ty mají využití pro sledování objektů na oběžné dráze a upřesňování jejich drah, rotace či velikosti, ale také manévrování pomocí ablace materiálu, což slouží jako samotný pohon. Pulzní lasery jsou navíc nástrojem i pro výše zmiňovanou prospekční metodu spektroskopie laserem buzeného plazmatu či reflektační spektroskopii.¹² Pulzní lasery pro prospekční ablací, ablací s cílem odklonu kosmického smetí a charakterizaci se liší v řadě požadavků, náročnosti a zejména stavu vývoje. Na jejich podobnosti, propojitelnosti a až zaměnitelnosti lze ale vystavět výzkumný záměr. Pro laserový instrument, jak pro charakterizaci kosmických objektů, tak pro odklon kosmického smetí, je základním krokem určení parametrů, jaké by takový instrument měl mít. Zatímco v oblasti prospekční ablace již takové instrumenty existují a lze na čem stavě, pro oblast odklání kosmické tříště ablací je pro parametrizaci nutné základní výpočty a numerické modelování.

Klíčovým krokem pro odklání je definování přesných parametrů laserového instrumentu, které zajistí dosažení požadovaného přenosu energie na kosmické smetí potřebného pro změnu jeho dráhy. Pro odklon objektu z oběžné dráhy laserový paprskem je nutné snížení jeho perigea do výšky 200 km, odkud už samovolně spadne do atmosféry a shoří. Studie se liší v potřebné hraniční plošné hustotě energie k dosažení dostatečně silné ablace. Zatím nejkompexnější studie laserových satelitů pro úklid kosmického smetí na oběžné dráze, která stojí na parametrizaci 100 kW vláknového laseru pro odklon ve vzdálenosti 100 km, uvádí hraniční hustotu energie 1-5 J/cm².¹³ Studie DLR uvádí minimální hranici hustoty energie pro ablací smetí 7 J/cm² dosahující tahový součinitel 30 N/MW.¹⁴ Rozdíl je ale daný jinou frekvencí pulsů a tedy množstvím přenesené energie. Upřesnění tohoto parametru a modelování interakce mezi laserovým paprskem a různými materiály, ze kterých se skládá kosmické smetí, jsou klíčové pro určení potřebné plošné hustoty energie a tedy celkovému výkonu tohoto instrumentu. To obnáší studium interakce laseru s různými materiály vyskytujícími se mezi kosmickým smetím, kam patří zejména hliník (44 %), kompozitní materiál (37 %), tvrzená ocel (12 %), titanová slitina (12 %) či měď (7 %).¹⁵ Další nutností je studie interakce s různými tvary kosmického smetí. Parametry takového kosmického ablačního laseru jsou tím hlavním intelektuálním vlastnictvím takového projektu. Jediná

¹²O. Vinckier et al. SYSTEM PERFORMANCE MODELING OF THE LUNAR FLASHLIGHT CUBESAT INSTRUMENT. <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2018/pdf/1030.pdf>

¹³Soulard, R., Quinn, M. N., Tajima, T., & Mourou, G. (2014). ICAN: A novel laser architecture for space debris removal. *Acta Astronautica*, 105(1), 192–200. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2014.09.004>

¹⁴DLR Study. Laser-Based Space Debris Removal An Approach for Protecting the Critical Infrastructure Space. <https://elib.dlr.de/105165/1/Laser-Based Space Debris Removal.pdf>

¹⁵Z. Z. Gong, K. B. Xu, Y. Q. Mu, et al. The orbital debris environment and the active debris removal techniques, *Spacecraft Environment Engineering*. 2014, 31(2): 129-135.



firma, která veřejně vývoj tohoto systému zveřejnila, japonské Sky Perfect JSAT, již požádala o jeho patent na tuto metodu ablace.¹⁶

V oblasti prospekce kosmických surovin pro účel těžby je studie interakcí mezi laserem a nebeským tělesem stejně klíčová. Jedná se ale o velmi rozdílný a mnohem komplexnější systém, který je už signifikantně rozvinut řadou kosmických misí a agentur.¹⁷ Pro LIBS ve vesmíru se používají převážně Nd:YAG lasery (Čína i USA) s vlnovou délkou 1064 nm, délkou pulzu v řádu jednotek nanosekund a na vzdálenost jednotek metrů.¹⁸ Lasery Ti:SAF ale se mohou jevit jako vhodnější z hlediska většího množství vypařovaného materiálu, což může mít větší efekt zejména při odklonu těles.¹⁹ Bezkalibrační metodu LIBS lze vnímat jako jednu z nejvhodnější kvůli nepotřebě před-analytických nástrojů pro plynná, kapalná či pevná skupenství, ale také díky minimální destrukci vzorku.²⁰ Počáteční studie a parametrizace takového instrumentu již proběhly v rámci tohoto grantu, kde výsledky interakce mezi různými typy laseru a meteority byly extrapolovány na kosmické vzdálenosti.²¹ Vliv okolních podmínek na ablační metodu, jako závislost doby trvání plazmatu na okolním tlaku (v případě absence atmosféry a nižšího tlaku je přítomnost plazmatu kratší), vyžaduje další výzkum. Interakční studie by se pak měly zaměřit zejména na měsíční simulanty a materiály představující kosmickou tříšť.

Zatímco metoda LIBS je nejen numericky, ale také prakticky prozkoumanější, využívání ablace k odklonu smetí ve vesmíru je prakticky nerozvinuto. Nicméně, jak pro parametrizaci laseru pro dálkové spektroskopii laserem buzeného plazmatu, tak pro ablací kosmického smetí pro jeho odklon je zásadní numerické modelování, simulace těchto interakcí a definice celého optického systému. Právě modelace těchto interakcí a požadavků na optický systém je tím nejdůležitějším, co mohou české laserové kapacity nabídnout a kde leží obrovský potenciál. Teprve na jejich základě lze přesně parametrizovat vlastnosti laserového instrumentu pro tyto účely. Následující sestavení laseru a jeho palubních požadavků bude výzvou, kterou nemusí Česká republika nutně sama kompletně pokrýt.

Palubní požadavky

Většina nástrojů pro integraci takové kosmické sondy s laserovým instrumentem je komerčně dostupná a zahrnuje nástroje pro přenos a zpracovávání dat, navigaci, komunikaci, manévrování, zdroje energie a kontrolu teploty systému. Parametrizace laserového instrumentu tak může definovat palubní požadavky, zejména v oblasti zdroje energie a tepelné kontroly. Požadavky na zdroj energie budou také určovány typem laseru. Využití polovodičových laserů přímo čerpaných sluncem může energetické požadavky snížit, ale za cenu potřeby inovativní optiky s dostatečnou prahovou intenzitou. Překážkou je také vzájemně se vylučující kvalita (fokusovatelnost) paprsku a jeho vysokého

¹⁶ SKY Perfect JSAT Group. Designing and Developing the World's First Satellite for Removing Space Debris with a Laser. https://www.kyushu-u.ac.jp/f/39812/20_06_11_01_EN.pdf

¹⁷ Mezi instrumenty na LIBS patří americká ChemCam (2011 Curiosity) a jeho pozdější verze SuperCam (Mars2020, Perserverence), čínský MarSCoDe () či indický LIBS (2019 Chandrayaan-2, Pragyan).

¹⁸ https://www.researchgate.net/publication/341958515_Laser-induced_breakdown_spectroscopy_in_planetary_science

¹⁹ Křivková Anna, Výkonové lasery ve výzkumu prvkového složení meziplanetární hmoty pro aplikace v experimentální astronomii a kosmonautice. <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/90240>

²⁰ Křivková Anna, Výkonové lasery ve výzkumu prvkového složení meziplanetární hmoty pro aplikace v experimentální astronomii a kosmonautice. <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/90240>

²¹ Krůs Miroslav, Výzkumné potřeby vývoje laserů pro vesmírné aplikace



výkonu. Nepřímo sluncem čerpané lasery s využitím solárních panelů a laserových diod tak mohou být spolehlivějším řešením.²²

Dalším klíčovým požadavkem jak pro metodu LIBS, tak i detekci kosmické tříště je složitá architektura celého instrumentu. V případě LIBS zahrnuje nejen spektrální kameru, ale také další přístroje na zpracovávání dat, spekter či kalibrační laser, zatímco v případě detekce kosmické tříště například optický detektor. Špičkové kapacity v oblasti inovace optických detektorů jsou jedním z hlavních zaměření pracoviště Ivana Procházky na ČVUT. Kamery pro spektroskopii pak jsou plánovaným instrumentem pro ambiciózní kosmickou misi ze strany konsorcia ústavů Akademie věd ČR. Nicméně, specializace na vývoj samotného laseru může být tou danou přidanou hodnotou ČR, ale i k tomu je nutná znalost a správa celého systému. Propojitelnost těchto dvou aplikací by měla být hlavním tématem takového projektu.

Dalším klíčovým segmentem je zpracovávání dat. Obě metody generují velký objem. Ústav fyzikální chemie J. Heyrovského Akademie věd ČR vyvinul vlastní software v jazyce Python zvaný ablator2go právě na detailní analýzu spekter laserové ablace. V druhé aplikaci pak může být zmíněn software firmy Iguassu pro automatickou katalogizaci dat z optického senzoru, konkrétně teleskopu Evropské kosmické agentury NEOSTEL.²³ Z hlediska palubních požadavků ale zpracovávání dat představuje zejména potřebu na komunikaci a posílání velkého objemu dat.

Pro tyto palubní požadavky ČR disponuje řadou technologií, které mají velký potenciál, ale také jsou již připraveny na kosmické využití (solární panely, spektrální kamery, navigace). Vedle pozemního výzkumného a vývojového segmentu je klíčové jeho testování v letu. Jednoduchým řešením je koupě místa na raketě, které se pohybují již v řádu desítek tisíc dolarů. Nicméně, outsourcing již testovací fáze není ideální a je na místě se snažit i tyto finance směřovat na domácí trh. Platforma Stratosyst díky své nosnosti a napájení je vhodným nástrojem pro testování kosmických přístrojů, konkrétně pak pro laserové instrumenty, které jsou zaměřením tohoto dokumentu. Pro ČR je to nejideálnější forma rozvoje upstream sektoru kosmického průmyslu, který je jinak nedosažitelný pro malou zemi jako je Česko. Sektor upstreamu není samostatný a silně závisí na státní podpoře. Sektor malých raketových nosičů na rozdíl od těch velkých ustálených korporací s dlouhodobě jistým přísunem zakázek, jsou ale závislé na svém rozjezdu mnohem více na vládní podpoře. Jakákoliv podpora a rozvoj i stratosférických kapacit je dostupnou variantou pro ČR.

²² Krůs Miroslav, Výzkumné potřeby vývoje laserů pro vesmírné aplikace

²³ Jiří Doubek et al, „NEOSTEL Data Processing Chain”, Proceedings from the 1st NEO and Debris Detection Conference. ed. Tim Flohrer a Rudiger Jehn (Darmstadt: ESA, 2019), <https://conference.sdo.esoc.esa.int/proceedings/neosst1/paper/359/NEOSST1-paper359.pdf>.



Závěr

Možnosti podpory kosmického segmentu ze strany České republiky jsou dané velikostí její ekonomiky a typem technologických schopností, kterými disponuje. I tak může ale středně malá země rozvíjet strategické kapacity díky efektivnímu cílení a systematické podpoře národních nik a specialit. Národní nikou pro Českou republikou, kterou tento dokument předkládá, je sektor laserových aplikací ve vesmíru a efektivním cílením jsou exponenciálně rostoucí kosmické segmenty těžby ve vesmíru a zabezpečení kosmického provozu s exponenciálně rostoucími komerčními příležitostmi.

Rychlý nárůst počtu satelitů na oběžné dráze bude vytvářet velké navýšení potřeb služeb STM. První potřebou je upřesňování orbitů objektů s cílem snížení vysoké míry falešných varování před kolizí a tím zahlcením satelitních operátorů. Tržní hodnota segmentu STM tak mezi roky 2019 a 2035 vzroste víc jak čtyřikrát a to zejména v oblasti komerčních operátorů. Příležitosti pro Českou republiku představuje oblast unikátního kosmického laserového instrumentu pro a) sledování provozu ve vesmíru (jak satelitů tak smetí), b) pro manévrování kosmického smetí pomocí ablace. Instrument pro sledování orbitů, rotace, velikosti a materiálu satelitů ale i kosmického smetí může být zajímavý pro státní agentury jako zdroj přesnějších dat pro snížení množství falešných varování. Získání podpory pro rozvoj takového instrumentu na evropské úrovni je z hlediska slabé unijní finanční podpoře SST a absenci ČR v EU SST je ale méně pravděpodobné. Větší příležitostí může pro takový instrument představovat soukromý sektor, který jej jako komerční dodavatele využije pro zpřesnění svých dat SST pro veřejné instituce (jak v USA či pro členské státy EU participující v EU SST) či je využije pro rozšíření množství sensorů a zkvalitnění komplementárních modelů stavu kosmického provozu zkvalitnění nabídne jako kompletní STM službu satelitním vlastníkům. Laserový instrument pro ablaci a odklon smetí ale může být ale atraktivní pro operátory komunikačních satelitů na geostacionární dráze, které jsou těžce nahraditelné, či na nízké oběžné dráze, kde bude větší riziko střetu a nákladnější služby STM.

Z hlediska kapacit ČR je prvním krokem zejména studie a modelace interakce laserových paprsků s různým materiálem pro účely sledování či manévrování kosmických objektů na oběžné dráze ablací, ale také pro možnost dálkové ablace nebeských těles. Vytvoření stabilně fungujících numerických modelů pro laserovou ablaci různých materiálů kosmické tříště tak samo o sobě představuje klíčové know-how s velkou vědeckou hodnotou. Velkou komerční hodnotu pak může přinést definice požadavků na celý optický systém a jeho testování, a finální parametrizace celého instrumentu. Tyto kritické základní kroky se ale těžko obejdou bez přímé podpory ze strany ČR, jelikož v tak rané fázi vývoje je těžké očekávat investice soukromého sektoru, jakkoliv zajímavý finální produkt může být.



This report was supported by the Technological Agency of the Czech Republic. Particularly through a scientific grant TACR TL01000181: "A multidisciplinary analysis of planetary defense from asteroids as the key national policy ensuring further flourishing and prosperity of humankind both on Earth and in Space."