

Malé družice

Petr Ondráček

Anotace

Výukový materiál se věnuje problematice spojené s vývojem a využíváním perspektivní technologie malých družic a jejich budoucími trendy v různých oblastech aplikací využívajících kosmický prostor a představující komoditu na kosmickém trhu.

Technologie malých družic provozovaných na nízkých oběžných drahách od 400 do 1200 km díky malým rozměrům a hmotnostem do 1000 kg, používáním běžné produkce pro jejich stavbu a provoz jak družic, tak pozemních stanic, možností být vynášeny do kosmu jako součást misí velkých družic, zkrácení doby předstartovních testů a délce misí do 3 let umožňuje podstatné snížení finančních nákladů. To otevírá dveře participaci malých výrobních podniků, akademických a výzkumných týmů a dalších amatérských zájemců.

Malé družice představují revoluční inovační prvek v celém řetězci od výroby kosmických technologií, prostředků pro vynášení a umístování družic v kosmu po komunikace, řízení provozu a ochrany před kosmickým odpadem. Ty jsou dnes označovány shrnujícím pojmem „Nový kosmický průmysl“.

Oblast malých družic je svázána s řešením řady témat spojeným s technickými a právními nástroji pro regulaci, správu rádiového spektra a k zajištění svobodného přístupu pro využívání kosmu, ochrany družic a jejich užitečného nákladu a před znečištěním (kosmickým odpadem).

Předkládaný materiál je zaměřen na poskytnutí základní orientace v širokém souboru témat dotýkajících se problematiky stavby a provozu malých družic zejména standardu CubeSat na nízkých oběžných drahách. Dále pro uplatnění ve výuce na středních školách, k dalšímu univerzitnímu studiu a v praxi.

Cíle

Získání základního přehledu o současném stavu a trendech technologie malých družic, technických a legislativních požadavků pro plánování a realizaci jejich misí a pro další univerzitní studium a využití v praxi.

Klíčová slova

Kosmos, malá družice, mise, rádiové spektrum, oběžná dráha, payload, nosná raketa, konstelace, rádiová interference, standard CubeSat, pozemní segment, kosmický segment, telemetrie, SDR rádio, antény, sledovací software, simulátor CubeSat, dálkový družicový senzoring, testbed, Dopplerův efekt, Kesslerův syndrom.

Datum vytvoření

25.06.2019 – aktualizace 13.7.2022

Časová dotace

352

Jazyk

cs

Zdroje

- [1] Madry Scott, Martinez Peter, Laufer Rene: Inovative Design, Manufacturing and Testing of Small Satellites, Springer, 2018, 161. ISBN 978-3-319-75093-4.
- [2] Jakhu R.S.: Space Mining and Its Regulation. Springer, 2017, 181. ISBN 978-3-319-39246-2_1.
- [3] Pluczek E., de Casor E., Hyland D.: The Cubesat Book, Princeton Satellite System Inc., 2010, 33, ISBN 978-0-9654701-0-0.
- [4] Baron Andrew: Amsats and Hamsats. RSGB, 2018, 362. ISBN 9781-9101-9354-9.
- [5] Davidoff Martin.R.: The Satellite Experimentsr's Handbook. The American Radio Relay League,1985, 207. ISBN 0-87259-004-6.
- [6] Madey J.M., Baumann R.C., Design Techniques for Small Scietific Satellite Structure, NASA Technical Note TN D-4988,1969.
- [7] Wood L. and space team, Cisco Systems: Introduction to satellite constellations. Guest lecture, ISU summer session, July 2006.
- [8] Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development“. UN General Assembly document A/RES/55/2, 2015, (<https://undocs.org/A/RES/70/1>).
- [9] Barron Andrew: SDR – Software Defined Radio,. Radio Society of Great Britain. 2017, ISBN 9781 9101 9346 4.
- [10] United Nation Convention on International Liability for Damage Caused by Space Objects <http://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/spacelaw/treaties/introliabilityconvention.html>.
- [11] Long-term Sustainability of Outer Space Activities, COPUOS 2017, <http://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/topics/longterm-sustainability-of-outer-space-activities.html>.
- [12] Hedman N.: The Outer Space Legal Regime and UN Register of Space ObjectsI, Presentace na ITU-R Symposium and Workshop on the Small Satellite Regulation and Communication Systems. Praha 2. – 4. března 2015.

- [13] Mahr Eric, Tu Anh, Gupta Anil: Development of the Small Satellite Cost Model. Aerospace Corp., Presentace na NASA Cost Symposium. 2015, <https://pdfs.semanticscholar.org/2654/787f913203f58ac40e01243b6b88715e20c5.pdf>
- [14] Ondráček Petr: Současnost a budoucnost systémů využívajících malé družice. Sborník přednášek 25. konference Radiokomunikace. UNIT s.r.o., 2015, ISBN 978-80-905345-6-8.
- [15] CubeSat specification, CubeSat Design Specification Rev. 13., California Polytechnic State University, 2014.
- [16] CubeSat 101: Basic Concepts and Processes for First-Time CubeSat Developers. NASA CubeSat Launch Initiative. 2017.
- [17] Independent Verification and Validation team: NASA Operational Simulator for Small Satellites NOS3 - User Manual. NASA IV&V Fairmont. <http://www.stf1.com/NOS3Website/Nos3MainTab.html>
- [18] Masopust J., Verřát I., Linhart R., Voborník A., Dániel V., Svoboda P.: Aplikace malých satelitů (co nového). Sborník přednášek XXVII. Konference Radiokomunikace. UNIT s.r.o., říjen 2017. ISBN 978-80-87942-33-8.
- [19] Masopust J.: VZLUSAT-1 první český nanosatelit. Presentace na XXVII. Konferenci Radiokomunikace. Říjen, 2017.
- [20] Report of the World Commission on Environment and Development: "Our Common Future", Transmitted to the UN General Assembly as an Annex to General Assembly document A/42/427, 1987.
- [21] "Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development", UN General Assembly document A/RES/70/1, distributed on 21 October 2015. <https://undocs.org/A/RES/70/1>.
- [22] Karacalinglu G. Impact of new Satellite Launch Trends on Orbit Debris. Space and Safety Magazine, June 2, 2016.
- [23] Kroeker E., Ghosh A., Coverstone V.: Building Engineers: A 15-Year Case Study in CubeSat Education. Proceedings of 30th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites. AIAA/Utah State University, 2016 (<https://pdfs.semanticscholar.org/0e6d/a27d52124fbaa812a89676853abaf1599aa5.pdf>).
- [24] Podzimková L., Dvořáková I.: EarthKAM –využití mezinárodního projektu NASA ve škole, http://home.pf.jcu.cz/~vnufcb/CD/pdf/VNUF23_27.pdf.
- [25] Henri Y.: The ITU -Challenges in the 21st century related to SMALL SATELLITES. Presentace na ITU-R Symposium and Workshop on the Small Satellite Regulation and Communication Systems. Praha 2. – 4. března 2015.

[26] Matas A.: International Telecommunication Union ITU - RADIO REGULATIONS related to SMALL SATELLITE Earth Stations (TA). Prezentace na ITU-R Symposium and Workshop on the Small Satellite Regulation and Communication Systems. Praha 2. – 4. března 2015.

1 Malé družice

1.1 Úvod

V současné době nastupuje stále intenzivnější využívání kosmu (Outer Space) nejen pro vojenské účely, ale zejména pro potřeby vědy, výzkumu a inovací v řadě odvětví jako například v telekomunikacích (TV a R vysílání, mobilní sítě Inmarsat, Iridium, GlobalStar,..), dopravě (družicová komponenta námořního automatického identifikačního systému AIS, kosmická komponenta v inteligentních dopravních systémech ...), v navigačních systémech (GPS, Galileo, Glonass, Beidou, ..) při ochraně životního prostředí (snímkování země pro potřeby zemědělství, vytváření geografických map, ...) a atmosféry, pro tvorbu meteorologických předpovědí nebo v bezpečnostních (globální letecký tísňový a bezpečnostní systém GADSS a námořní GMDSS, ...), záchranných a krizových systémech pro prevenci a řešení hromadných neštěstí a přírodních katastrof.

Využívání kosmu pomocí umělých objektů (družic, družicových stanic, pilotovaných kosmických lodí, sond, ...) bylo od počátku v padesátých letech minulého století spojeno s nemalými investičními prostředky (řádově miliardami amerických dolarů) jak pro vývoj a výrobu kosmických technologií a jejich užitečného nákladu (vědecké a výzkumné experimenty), tak pro jejich vyslání do kosmu a řízení provozu družic pomocí pozemních stanic, včetně jejich zániku. Dlouhodobá investiční náročnost byla rovněž důsledkem požadavků na minimální dobu provozu více jak 10 let a na vývoj vysoce speciálních a spolehlivých technologií schopných pracovat v extrémních podmínkách kosmu, jejich dlouhodobé testování, včetně zálohování kritických částí takových misí.

Proto využívání kosmu bylo zpočátku doménou vládami řízenými institucemi a vládními vojenskými, špionážními a vědecko-výzkumnými programy v rámci jednotlivých misí. USA tyto mise realizovaly prostřednictvím vládní kosmické agentury NASA a bývalý Sovětský svaz v rámci svého kosmického programu. Od počátku probíhala soutěž mezi těmito velmocemi, které měly k dispozici i dostatečně výkonné nosné rakety pro jejich vysílání do kosmu. Družice na orbitálních a geostacionárních drahách a jejich užitečný náklad (dále bude používán obecný anglický termín „payload“) s hmotností řádově v tisících kilogram byly pro veřejné účely používány v programech převážně pro výzkum kosmu a stavu atmosféry, telekomunikace, družicovou navigaci, meteorologické služby, fotografické snímkování, atd. Postupem času se k těmto velmocem přidaly další státy jako Japonsko, Indie, Čína a další státy včetně bývalého Československa (vynesení první naší družice Magion 1 v září roku 1981). Rovněž pokračoval vývoj kosmických technologií na vypouštění umělých objektů jako raketoplánů nebo raket dopravující lidské posádky nebo náklad na jiné stále mise (například na Mezinárodní kosmickou stanici ISS), výzkumné sondy a další mise na blízké a vzdálené planety uvnitř nebo vně naší sluneční soustavy.

Již od samého počátku využívání kosmu byla věnována velká pozornost zajištění svobodného přístupu k mírovému využívání kosmu pro všechny státy Země a ochrany vysílaných umělých objektů, včetně zajištění řízeného zániku. To bylo důvodem že na půdě Organizace spojených národů OSN pro schválení Rezoluce č. 1348 (XIII) v roce 1958, jejíž součástí bylo nejprve ustavení ad-hoc skupiny pro mírové využívání kosmického prostoru. V dalším roce pak rezoluce 1472(XIV) přeměnila tuto skupinu na stálý výbor UN COPUOS (The Committee on the Peaceful Use of Outer Space, zkráceně COPUOS), kterou schválilo 24 států. Bývalé Československo patřilo mezi jeho zakládající členy.

Do využívání kosmu se postupně zapojovaly vědecké instituce a průmysl dalších zemí podílejících se na vědeckých programech, aplikacích pro telekomunikace, lokalizaci - navigaci, dálkové monitorování Země, meteorologické služby a pro vojenské účely. Není jistě bez zajímavosti, že do aktivit v kosmu již od počátku vstupovaly i privátní zájmové skupiny především z řad radioamatérů. Výsledkem byla stavba a vypuštění družice OSCAR 1 už v roce 1961 a pak jejích následovníků.

Významnými kroky pro využívání kosmu byly mise sond na Mars, Měsíc a mimo naši galaxii, včetně letu Appola 11 spojeného s přistáním lidské posádky a vystoupením N. Amstronga a E. Aldrina na Měsíci 20. v června 1969. Dále pak program na vybudování Mezinárodní kosmické stanice ISS (International Space Station) na oběžné dráze ve výšce 400 km. Jejím základem byl sovětský modul Zarja vyslaný v září roku 1998 na základě společného programu kosmických agentur: NASA, Roskosmos, JAXA, CSA a ESA (účastní se 11 z jejích členů; Belgie, Dánsko, Francie, Německo, Itálie, Nizozemsko, Norsko, Španělsko, Švédsko, Švýcarsko a Velká Británie) a Brazílie. Dopravu posádek zajišťovaly raketoplány USA a dnes ruské nosné rakety Sojuz. Náklad je dopravován raketami ruskými nosnými raketami Progress, americkými Dragony a Cygnusy a japonskými HTV.

Dnes lze za kosmické velmoce považovat USA, Rusko, Čínu a Indii a vlastně také EU prostřednictvím Evropské kosmické agentury ESA a používaných nosných raket Ariane.

Novým převratným fenoménem současnosti se stává účast privátního sektoru jak v oblasti vynášení družic (např. Space X miliardáře Elona Muska a jeho nosné rakety Falcon a Dragon, SpaceShipOne Paula Allena a Burt Rutana a dalších), tak kosmických misí a aplikací v telekomunikacích a dálkového senzoringu.

Pro stále rostoucí potřeby využívání kosmu se využívání pouze konvenčních velkých družic a výroba potřebných technologií ovládána pouze několika velkými společnostmi jako například americký Boeing, spojení s vojenským využitím v 90 letech minulého století ukázalo jako silně omezující pro další rozvoj využívání kosmu. Dlouhodobé mise vyžadují technicky a investičně náročnou přípravnou fázi a jsou doprovázeny velkým rizikem ztráty investic v případě

neúspěchu způsobené havárií nosné rakety na startu, nedosažením požadované orbitální pozice či částečnou nebo úplnou ztrátu funkčnosti payloadu nebo systémů vlastní družice.

Proto byla snaha nalézt nové cesty, které by technicky i investičně byly schůdné pro širší zapojení jak vědy, tak průmyslu a měly přijatelnou míru rizika neúspěchu. Rovněž sílil tlak na to, aby bylo umožněno i v kosmickém průmyslu uplatnění malých a středních podniků a vytvořeny podmínky pro širší zapojení vědeckovýzkumných institucí včetně univerzit a středních škol do vlastních kosmických programů. Tyto snahy nakonec na přelomu 21. století vyústily ke vzniku toho, co je dnes zahrnován pod pojem „Nový kosmický průmysl“ (New Space Company, New Space Industry)“, jehož produktem jsou malé družice. Technologie malých družic je také považována za prvek představující takzvanou Družicovou revoluci. Malé družice jsou produktem spolupráce a spojení neziskového a privátního sektoru. Jejím příkladem je produkce společností Aerospace nebo Planet Lab.

Co malé družice nabízejí si můžeme dokumentovat na krátkém videu.

<https://www.geospatialworld.net/videos/https-youtu-be-mtjzjjrak28/>

Video 1. Malé družice a jejich využití

Malé družice, které budou dále podrobněji diskutovány, jsou charakterizovány hmotností v rozsahu 50 gramů (femtodružice) až 500 kg (minidružice), létající na nízkých oběžných drahách - LEO (Low Earth Orbit) do 1200 km, s krátkodobými misemi trvajících do tří let a zpočátku tvořící přívažek misí velkých družic. K jejich konstrukci a výrobě je využívána běžná produkce z pozemských aplikací se zaměřením na vytváření finančně dostupných stavebnic pro široký okruh zájemců, včetně univerzit a středních škol.

Typickým představitelem jsou malé družice stavebnicové konstrukce akademického programu CubeSat, který je dnes de-facto standardem v této oblasti. Program CubeSat je průkopníkem v této oblasti a přinesl možnost výroby stavebnic družic od jednoho až po šest modulů, které si zájemci mohou přímo zakoupit. Jejich vývoj a výrobu umožnila například dnes široce dostupná a používaná technologie 3D tisku. Jejich pokračovatelem je již výše zmíněná produkce společností Aerospace DS a Planet Lab. vniklá jako takzvaný „start up“.

Pro rozvoj malých družic je zásadním aspektem, že nejsou jen přívažkem misí velkých družic, ale samostatnou platformou určenou pro vysílání a umístování velkého počtu malých družic. To umožňuje podstatně snížit náklady na různé projekty a tak zpřístupnit i tuto oblast širšímu počtu výzkumných, malých a středních výrobních podniků a edukačních subjektů.

Že jde o atraktivní a perspektivní družicovou technologii a významný segment na kosmickém trhu lze dokumentovat již dnes jejich rozsáhlým využíváním například v telekomunikacích, v

senzorickém monitorování Země a atmosféry, prevencí a řešení přírodních katastrof atd. Například záměr společnosti *Google*, ve spojení s významnou investiční společností *Fidelity* a americkou soukromou společností *Space X*, na vytvoření lokálních sítí z několika tisíců malých družic pro poskytování internetu zejména v rozvojových a ostrovních státech s nízkou ekonomickou a nedostatečnou telekomunikační infrastrukturou a pro podporu podnikání ve spojení se společností *Amazon*. V této souvislosti není rovněž bez zajímavosti ani záměr hackerské skupiny *Hackerspace Global Grid* vytvořit vlastní komunikační síť s malými družicemi. Můžeme si u tohoto projektu položit otázku, k čemu budou použity.

Dalším příkladem je projekt *OneWeb* se sítí s cílovou konstelací tvořenou 648 malými družicemi vážícími kolem 200 kg na 18 orbitálních ve výškách 1200 km pro potřeby globálního pokrytí internetu zejména v odlehlých oblastech. V únoru roku 2019 bylo úspěšně vypuštěno prvních 6 družic.

Je zřejmé, že malé družice začnou hrát i významnou roli v ochraně před terorismem a ve vojenských aplikacích v předpokládaných kosmických vojenských operacích. Což lze dokumentovat i nedávným oznámením USA o záměru založení kosmické armády.

V blízké budoucnosti lze očekávat výrazný růst významu malých družic v souvislosti s rozvojem internetu věcí a aplikacemi umělé inteligence a robotizace v oblastech všeobecně nazývaných jako „Smart“ a spojených s vysokorychlostními sítěmi 5 generace. To je spojeno i s inovacemi, které jsou součástí další průmyslové revoluce označované jako „Průmysl 4.0“.

Z výše uvedeného krátkého přehledu je zřejmé, že malé družice v současném pojetí jsou opravdu zajímavým segmentem družicového trhu a s velkým potenciálem svého rozvoje se stávají zajímavým investičním artiklem. Jsou také obrovským nástrojem pro akademickou sféru v aplikacích i ve výuce. Což již dne dokazují tisíce malých družic létajících v kosmu postavených a provozovaných i středními školami a universitami.

Jako vždy, tak i v tomto případě je zavádění a využívání technologie malých družic spojeno s řadou dalších otázek, které bude nutné včas řešit. Zcela bez pochyby to také v dnešním světě vyvolává i řadu otázek kolem možného zneužití pro nekalé účely a zajištění bezpečnosti při použití této technologie.

Nárůstem počtu umělých těles v kosmu s sebou nese, ale i řadu rizik plynoucích z možnosti srážek způsobených ztrátou kontroly nad družicemi, nežádoucí rušení (interference) v rádiové komunikaci a rostoucího vytváření kosmického odpadu (kosmického smetí). Jedním z mnoha příkladů této skutečnosti byla srážka a zničení družice č. 33 telekomunikačního systému *Iridium* února 2009 s již nefunkční ruskou vojenskou telekomunikační družicí *Kosmos 2251* v únoru 2009. Takových incidentů s rostoucí hustotou aktivit nejen malých družic v kosmu přibývá a je zřejmé, že budou narůstat.

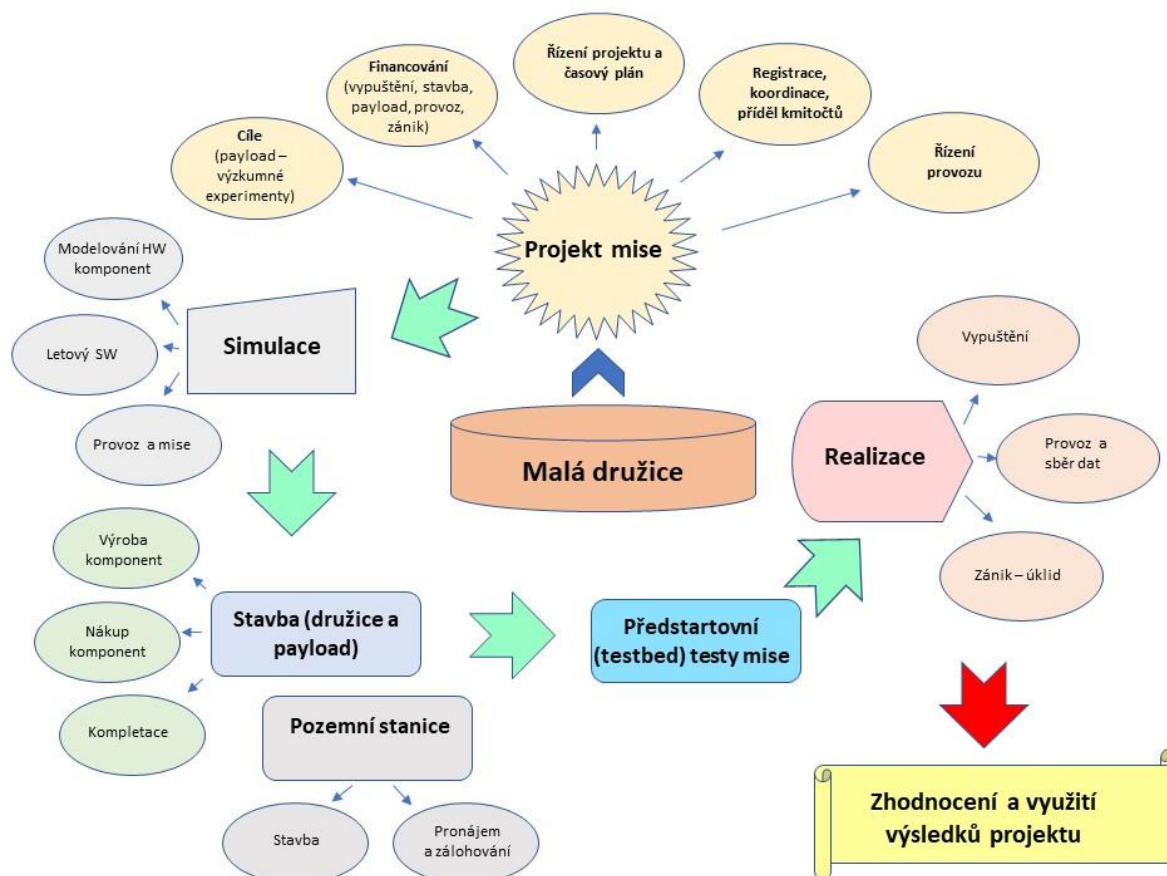
Proto je a bude nezbytné přinést řadu opatření technického legislativního charakteru i v oblasti malých družic pro zajištění bezpečnosti a ochrany v kosmu. Tím také napomoci k udržitelnému rozvoji života na Zemi tak, jak je obsaženo v jednotlivých programových cílech OSN pro udržitelný rozvoj života na Zemi do roku 2030 (Sustainable Development Goals by 2030).

Jak již bylo uvedeno, tak jedním ze základních aspektem v kosmu je zajištění bezpečné a nerušené rádiové komunikace a družicových služeb jak v kosmickém, tak pozemním segmentu, ale i všech současných a budoucích radiokomunikačních služeb ve využívaných rádiových pásmech. To je zvláště důležité pro očekávaný nárůst množství malých družic a jejich sítí, které se již dnes pohybuje v řádech tisíců.

Přidělování pozic na oběžných drahách a části rádiového spektra pro družicové služby a jejich ochrana před nežádoucím rušením je zajišťována prostřednictvím Radiokomunikačního řádu (Radio Regulation) Mezinárodní telekomunikační unie ITU (International Telecommunication Union).

Téma malých družic je rovněž spojeno s problematikou zajištění svobodného přístupu, bezpečnosti a ochrany kosmického prostoru. To s sebou nese i potřeby regulace a legislativních opatření na národní i mezinárodní úrovni v oblasti majetkové ochrany družic, odpovědnosti za škody způsobené jejich provozem a zajištění řízení likvidace malých družic po ukončení jejich provozu. Toto je zajišťováno prostřednictvím mezinárodní úmluvy OSN o kosmu („Outer Space Treaty“) a řady jejich dalších právních dokumentů. Jejich naplňování je předmětem činnosti orgánů zřízených při OSN, kterými jsou již výše zmíněný COPUOS a Úřadu pro kosmické záležitosti OOSA (Office of Outer Space Affairs).

Postup a soubor činností spojených s realizací projektu mise malé družice či sítě (její konstelace) více malých družic je ve zjednodušené formě shrnut na obr. 1.



Obr.1 Postup a činnosti při návrhu a realizaci mise malé družice

Oblast využívání technologie malých družic v sobě zahrnuje i přípravu kvalifikovaných odborníků z mnoha oborů, které souvisí jak z technickými, tak právními aspekty dotýkajících se využívání kosmu.

Jak již bylo uvedeno, tak využívání malých družic je vysoce perspektivním trendem ve využívání kosmu, který otevírá prostor pro malé podniky a týmy a jejich kreativitu spojenou se stavbou malých družic a komponent jejich užitečného nákladu, jejich vysíláním a provozováním, včetně způsobů zamezení incidentů mezi družicemi, potlačení vzniku kosmického odpadu pomocí procesů řízeného zániku (úklidu v kosmu).

Nelze pochybovat o tom, že malé družice a vše s tím spojené jsou perspektivní oblastí, která otevírá dveře pro aktivní zapojení studentů středních škol jak v oblasti vlastní stavby družic, tak i jejich payloadu v podobě různých vědeckých a průmyslových experimentů, včetně řízení vlastního provozu z pozemních stanic. Současně se tak otevírají široké možnosti mezinárodní spolupráce nejen škol a universit, ale i do programů významných světových kosmických agentur jako je například americká NASA nebo evropská ESA a řady privátních výzkumných a komerčních společností spojených s kosmickými technologiemi a s aplikacemi s využíváním kosmu. Tyto příležitosti jsou opravdu velice široké a budou narůstat.

Cílem předkládaného materiálu je shrnout a podrobněji popsat základní aspekty spojené s problematikou malých družic standardu CubeSat na nízkých oběžných drahách (LEO) se zaměřením na využití pro potřeby přípravy odborníků pro tuto oblast. Současně napomoci učitelům a studentům a dalším zájemcům v základní orientaci v oblastech souvisejících s tímto tématem a motivovat k dalšímu studiu a vlastním aktivitám.

Jistým problémem je, že už dnes tak široká problematika zahrnující nejen technické obory je dynamicky se rozvíjejícím obsahem desítek tisíc specializovaných publikací, každoročních konferencí, workshopů, neskutečného množství různých projektů.

K tomu přistupuje to, že prakticky každý den ve světě přibývají a zároveň zanikají další a další malé družice, či jejich sítě (konstelace). To vše se samozřejmě odráží i v nepřehledném množství publikačních a multimediálních zdrojů pro studium a samozřejmě i v jejich aktuálnosti.

Je tedy zřejmé, že to vše nemůže být obsaženo v jediné publikaci nebo dokumentu.

Proto je výklad v následujících kapitolách a podkapitolách především zaměřen na přehledový komplexní přístup s orientací na návaznosti v jednotlivých tématech tak, aby bylo možné snadno navázat a rozvíjet uvedené poznatky v dalším vlastním nebo univerzitním studiu. Současně je také využito přímo v praxi při plánování a realizaci vlastních projektů.

K tomu by měly napomoci i vybrané odkazy na publikace v závěru každého tématického okruhu jednotlivých velkých kapitol. K ověření pochopení, zopakování nebo případnému hlubšímu studiu probíraného tématu v jednotlivých kapitolách poslouží kontrolní otázky v testu.

Pro pochopení probírané látky jsou dostatečné znalosti z matematiky a fyziky na úrovni základní školy. Pro usnadnění studia a lepší orientaci v textu je zařazena samostatná kapitola zkratk a akronymů.

To, co bude v následujících kapitolách podrobněji diskutováno lze v úvodu ukázat i na jednou z nespočetných praktických aplikací mise malých družic v krátkém videu od NASA.

Ukázka jednotlivých fází přípravy a vypuštění projektu mise NASA Ames Research Center sestávající ze čtyř malých družic pro vědecké experimenty a testování nových technologií.

www.youtube.com/watch?v=RW811ouhJeU

1.2 Historie vývoje malých družic

Historie malých družic by vydala za samostatnou publikaci. Přesto bude užitečné se krátce věnovat alespoň tomu, co lze považovat za historické milníky vývoje malých družic a návaznosti na rozvoj nejen kosmických technologií, ale i regulace a legislativy. Malé družice totiž existovaly již od počátku lidského dobývání kosmu.

S ohledem na zaměření tohoto materiálu se budeme dále zaměřovat na kategorii malých družic (nazývané jako: mini – mikro – nano – piko – femto družice), které se pohybují na nízkých oběžných drahách do výšky 2000 km a s celkovou hmotností do 1500 kg.

Z hlediska nejen tohoto historického přehledu tedy ponecháme stranou malé družice na středních a vysokých oběžných nebo geostacionárních drahách. Ty byly a jsou využívány pro veřejné a vojenské aplikace družicových navigačních systémů (GPS, Galileo, Glonass, Beidou, ...), senzorového monitorování Země, radiokomunikačních pevných a mobilních služeb (Inmarsat, Iridium, GlobalStar, Thurya,..), bezpečnostních a záchranných systémů v letectví a námořní dopravě (GMDSS) a pro televizní a rozhlasové vysílání.

Za počátek malých družic je možné považovat první ruský Sputnik 1 s hmotností 83 kg ve tvaru koule o průměru 58 cm vyneseny dvoustupňovou raketou R-7 v říjnu 1957 lze z pohledu dnešní kategorizace umělých těles vysílaných do kosmu považovat za malou družici. Družice měla na palubě vysílač o výkonu 1 W v pásmech 20.005 MHz a 40.002 MHz) a po 1440 obletech Země zanikla po třech měsících v atmosféře. [<http://www.lib.cas.cz/space.40/1957/I001B.HTM>].



Obr. 2 První umělá družice Sputnik 1 před startem (NASA, A. Siddiqi)

Dalším mezníkem, které akcelerovaly vývoj malých družic za účasti privátních a akademických subjektů, bylo vypuštění první radioamatérské družice OSCAR 1 (12. prosince 1961). Družice o rozměrech 30 x 25 x 12 cm a hmotnosti 10 kg tvořila druhotný (sekundární přívazek) náklad mise s telekomunikační družicí Discover 36 byla vynesena raketou Thor DM-21 Agena-B. Družice 22 dní vysílala v morse kódu anglický pozdrav „Hi“. U zrodu projektu byli v roce 1960 radioamatéři z TRW Radio Club v americké Kalifornii ve spolupráci se automobilní společností TRW, California Defence Industry a místní univerzitou Foothill College. Postupně pak byly vypuštěny další družice OSCAR 2 až OSCAR 4. Po roce převzala tuto iniciativu mezinárodní družicová radioamatérská organizace AMSAT a ve spolupráci se Surrey Space Centre UoSat byla a je stále vypouštěna řada dalších OSCARů.

Významným milníkem v rozvoji využívání kosmu a tedy i segmentu malých družic byla realizace společného Rusko – Amerického projektu Mezinárodní kosmické stanice ISS (International Space Station) zprovozněné v roce 1998 a obývané lidskou posádkou od roku 2000. Její uspořádání je uvedeno na obr. 3.

Díky řady letů nákladních lodí a raketoplánů k této stanici bylo umožněno jako sekundárního nákladu vypouštění malých družic (velikosti nano, piko nebo femto) a tím realizovat mnohé školní a akademické projekty. ISS létá na nízké oběžné dráze ve výšce 412,9 km v nejnižším bodě nazývaném „perigeo“ a v nejvyšším nazývaném „apogeo“ ve výšce 418,3 km s dobou oběhu 92,7 minut. Na palubě nese řadu radiokomunikačních prostředků, která umožňuje hlasové a datové spojení i v rámci výuky školních experimentů, včetně radioamatérské činnosti. K tomu slouží program ARISS (Amateur Radio on International Space Station) organizovaný kosmickými agenturami NASA, Rosaviakosmos, JAXA, CSA, ESA.



Obr. 3 Uspořádání Mezinárodní kosmické stanice ISS (NASA)

Výrazné zapojení privátního sektoru přichází po roce 2000, které v praxi realizovalo princip nového kosmického průmyslu (New Space Company), se odrazil do vývoje nových a výkonnějších raketových nosičů. To přineslo významnou podporu rozvoje malých družic. Nosná raketa Falcon 1 společnosti Space X vedla k podstatné akceleraci rozvoje technologie malých družic na nízkých oběžných drahách (LEO, do 2000 km) a jejich použití v praxi. Díky této konkurenci s nosnými raketami USA, Ruska, Číny a ESA se podařilo podstatně snížit náklady na vypouštění malých družic.

Pro představu a srovnání například cena vyslání družice o hmotnosti 4,75 tuny americkou raketou Atlas se pohybovala kolem 164 mil. amerických dolarů (USD), což je 34,500 tis. USD za kilogram. Naproti tomu cena za vynesení 10 tun byla ESA raketou Ariane 200 mil USD, což je 20 tis. za kilogram. U nosné rakety Falcon 1 pak za 5.5 tuny to bylo 2 mil. USD, tedy již jen 11,27 tis. za kilogram. [4].

Jedním z mnoha příkladů, které díky těmto možnostem jsou malé družice produkovány dobrovolným sdružením vědců, výzkumníků a techniků z Amateur Satellite Organisation a americké Univesity of Surrey Space Centre – UoSat.

Začátkem tohoto tisíciletí byl pro odbornou výuku na univerzitách v USA navržen koncept stavebnicového systému CubeSat. První družice tohoto typu pak byly vypuštěny v roce 2003. Konstrukční provedení základního modulu označovaného jako 1U je na obr. 4.



Obr. 4 . Základní modul Cubesat 1U (AMES Research NASA)

Na jeho základě byl v roce 2009 navržen expertními dobrovolnickými týmy na základě spolupráce sdružených v radioamatérské asociaci a to anglické AMSAT-UK a holandské AMSAT-NL projekt mise několika malých družic pod označením FUNcube. První FUN cube -1 (AO 73) standardu U1 realizovaná školními týmy z oblasti radiotechniky, kosmu a fyziky byla vynesena ruskou raketou Dněpr 21. listopadu 20013.

Další příklad praktického uplatnění standardu CubeSat je v rámci evropského projektu projektu QB 50. Cílem projektu bylo demonstrovat možnosti participace školních týmů na výstavbě a provozu sítí malých družic pro výzkum termosféry (ve výškách 500 – 700 km). V roce 2017 bylo umístěním 36 nanodružic dosaženo projektovaného cíle. Ze stanice ISS bylo na oběžnou dráhu vypuštěno 28 nanodružic.

Z oblasti telekomunikací a zejména k poskytování přístupu do internetu v osamocených lokalitách je to projekt OneWeb s konstelací sítě s 648 malými družicemi CubeSat (viz obr. 5) s hmotností kolem 150 kg na polárních oběžných drahách ve výšce 1200 km. Dále je to projekt Starlink spojený se jménem Elona Muska a projekty jeho společnosti Space X. V konečné podobě v roce 2027 by měl sestávat s asi 12 tisíc družic, které mají zajistit poskytování vysokorychlostního připojení k internetu. Ten se významně podílí i na zajištění internetového provozu ve válce na Ukrajině. Starty a lety souboru malých družic (vláček) do cílových orbitálních drah jsou viditelné pouhým okem na noční obloze. Podrobnější informace o celém projektu jsou k dosažení na <https://www.elonx.cz/vse-o-konstelaci-starlink/>.



Obr. 5 Malá družice CubeSat v konstelaci projektu OneWeb (One Web Corp.)

Je třeba připomenout, že vedle úspěšných misí řada projektů skončila neúspěchem. To ať již ve fázi přípravné (nedostatek financí, rozpad týmů, negativní výsledky předstartovních testů, ...), tak neúspěšným startem nebo umístěním na oběžné dráze či havárií vlastní družice nebo jejího nákladu.

Za významný technologický aspekt pro konstrukci malých družic a jejich využití ve školních a akademických projektech je technologie 3D tisku a její dnešní dostupnost i z pohledu finančního. Počátky lze datovat do roku 1981, kdy Hideo Koadama (Nagoya Municipal Industrial Research Institute publikoval výsledky prototypu systému tisku na bázi fotopolymerů [<https://www.autodesk.com/redshift>]. Rovněž tak možnost zakoupení již hotových dílů, běžné produkce nebo celých stavebnic malých družic dává netušené možnosti vstupu do světa využívání kosmu.

Všechny výše uvedené skutečnosti tak otevřely reálné možnosti ve využívání kosmických technologií a kosmu i z akademické sféry a pro potřeby výuky. Přinesly také vznik mnoha zájmových uskupení, které se významným způsobem podílejí na řadě aplikací z oblasti družicových dálkových senzorů a telekomunikací.

Příkladem je koncept Planet Labs a jejich družice Dove pro družicový senzing. Ty jsou postaveny ze tří základními modulů standardu CubeSat (U3). Jejich praktické uplatnění je například při monitorování změn stavu řek a proudění v nich nebo při sledování hustoty parkování v nákupních center.

Dnes je v kosmu na oběžných drahách tisíce malých družic realizující různé vědecké a technologické experimenty a nacházející využití aplikací v telekomunikacích a sensorového sledování Země. Také mnoho jich denně zaniká a vytváří tak kosmický odpad se všemi jeho negativními důsledky.

Z hlediska regulace a legislativy spojené s využíváním kosmu a pro rozvoj kosmických komunikací bylo zásadním krokem konání mimořádné administrativní konference pro přidělení kmitočtových pásem pro kosmickou radiokomunikační službu v Ženevě v roce 1963. V roce 1967 vznikla na půdě OSN „Smlouva o mírovém využívání kosmu“ (Outer Space Treaty). Pro kontrolu jejího plnění byl založen v rámci UNCOPUOS Úřad pro kosmické záležitosti UNOOSA (Office of Outer Space Affairs, zkráceně OOSA). Ten má od roku 1992 sídlo ve Vídni.

Na základě této smlouvy je v základním dokumentu ITU - Ústavě ITU v článku 44 deklarováno, že rádiové kmitočty a orbitální dráhy jsou omezeným přírodním zdrojem, který je nutné racionálně, efektivně a ekonomicky využívat a pro všechny zájemce musí být zajištěn rovný přístup. Cílem článku 44 a následných ustanovení v Radiokomunikačním řádu (ITU RR – ITU Radio Regulation), schvalovaným na ITU světových radiokomunikačních konferencích

(WRC – World Radio Conference), je zabezpečení ochrany proti škodlivému rušení, stanovení celosvětových standardů pro zajištění interoperability a kvality, rovného přístupu a ekonomického využívání rádiového spektra a družicových orbitálních drah.

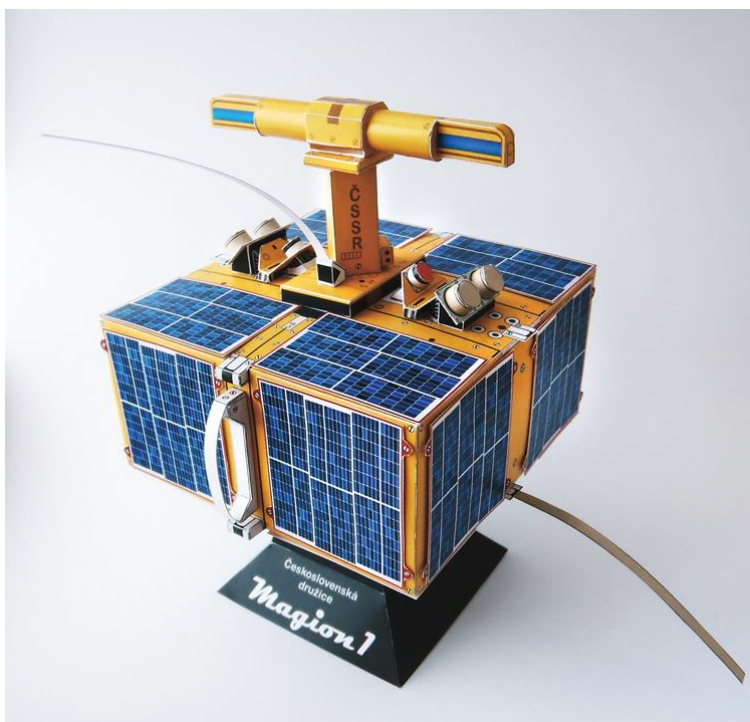
Jednou ze základních úloh OOSA je provádění registrace a udržování databáze všech umělých objektů v kosmu. V rámci COPUOS byla pracovní skupinou byla zpracována metodika potlačení znečištění kosmu v důsledku kosmického odpadu vzniklého z provozu všech druhů umělých objektů (tedy i malých družic).

Tady je potřeba se zmínit, že zvláště na akademické půdě je dnes tato problematika často stále opomíjena. Většina úsilí týmů je věnována vývoji vědeckého a výzkumného vybavení nebo konstrukci vlastní družice.

Otázky zajištění provozu malé družice a příslušné mezinárodní a národní legislativy zůstávají ve školních a akademických projektech obvykle hodně v pozadí, pokud jsou vůbec brány v potaz nebo se o nich ví. To je také dost častá příčina neúspěchu řady projektů, protože se s náklady na administrativní procesy a jejich možné finanční dopady nepočítalo. Důsledkem pak často je, že dochází k nemožnosti plnit termíny mise s ohledem na start nosné rakety nebo dokonce jsou zvolena kmitočtová pásma mimo přiděly v Radiokomunikačním řádu ITU. Rovněž povinnost registrace u OOSA také nebývá splněna.

V krátkém exkurzu do milníků historie malých družic nemůže chybět ohlédnutí za československými a českými aktivitami.

V letech 1977 až 1996 bylo v rámci kosmického programu INTERKOSMOS postupně vypuštěno 5 malých družic Magion (MAGnetospheric and IONospheric) vzniklých na půdě Československé akademie věd (ČSAV) a později Akademie věd České republiky (AVČR). Družice sloužily pro výzkum ionosféry a magnetosféry. Konstrukční provedení družice Magion 1 je na obr. 6. V roce 2003 byl realizován projekt družice MIMOSA pro astrodynamická měření.



Obr. 6 První československá malá družice MAGION – 1 (ČSAV)

V roce 2004 byl formulován projekt občanského sdružení czCube, který si kladl za cíl zkonstruovat a postavit malou amatérskou nanodružici a nanosondu (sluneční plachetnice) s modulovou koncepcí dostupnou i pro amatéry (finančně, organizačně a technologicky). Během deseti let se však nepodařila jeho praktická realizace. Proto byl v roce 2014 ukončen a v provozu je jen automatizovaná pozemní stanice czCube.

Od 23. června 2017 v kosmu první česká nanodružice VZLUSAT-1 realizovaná v rámci programu CubeSats – QB 50 (modul U2 – 20 x 10 cm, 7. rámcový program EU). Jedná se o společný projekt Výzkumného a leteckého zkušebního ústavu Praha, VUT Plzeň a FEL ČVUT v Praze. Její payload tvoří rentgenový teleskop, přístroj FIPEX pro měření atmosféry a detektor radiace družicového okolí pro ověření stínících vlastností kompozitních materiálů . Družice je řízena pozemní stanicí navrženou a provozovanou na VUT Plzeň (viz obr. 7).



Obr. 7 První česká nanodružice VZLUSAT – 1

V prvním pololetí roku 2022 byly postupně vyslány další CubSat české družice VZLUSAT-2 (<https://www.vzlusat2.cz/>), BDSat (<https://www.bdsat.cz/#project>) a první česká výuková družice Planetum-1 (<https://www.planetum.cz/druzice-planetum1/>). Monitorování provozu a komunikací je možné sledovat na webu <https://db.satnogs.org/>.

Krátký průřez historií vzniku a vývoje malých družic nepochybně dokladuje, že se jedná o perspektivní segment na kosmickém trhu. Je především reálnou možností pro zapojení středních škol do problematiky využívání kosmu. Zároveň může být pro studenty velkou motivací ke studiu a kariéře.

Proto v následujících kapitolách budou postupně probrány nezbytné teoretické základy a další aspekty spojené se stavbou, vypouštěním a provozem malých družic kategorie CubeSat na nízkých oběžných drahách (LEO – Low Earth Orbit).

1.3 Charakteristika a obecné aspekty malých družic

Pojem malá družice nemá jedinou všeobecně uznávanou definici a lze ji vyjádřit různými způsoby. Těmi mohou být fyzikální parametry (hmotnost, rozměry) nebo charakteristické parametry konstrukční a provozní.

Jak již bylo dříve uvedeno, tak s pojmem malá družice jsou svázány i záležitosti spojenými s požadavky na využívání rádiové spektra a oběžných drah spolu s povinnostmi vyplývajícími z plnění mezinárodních smluv o využívání kosmu.

S přihlédnutím na tato fakta budeme pro naše potřeby dále používat dělení kategorií malých družic používaných v rámci administrativních procesů u OOSA (registrace v COPUOS) a ITU (notifikace, správa rádiového spektra a oběžných drah).

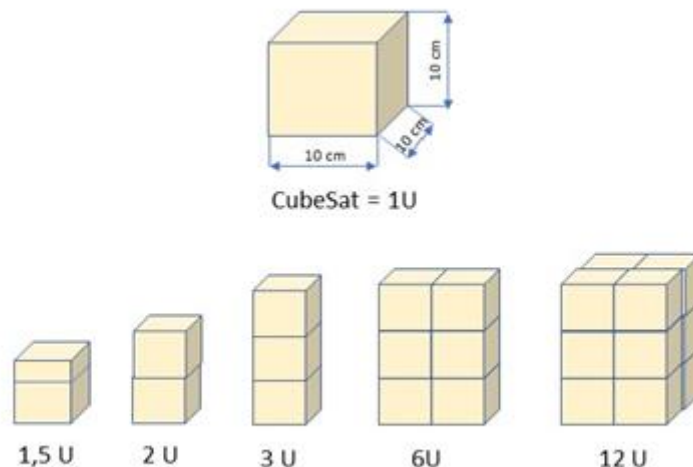
Z tohoto pohledu jsou malé družice rozděleny podle své hmotnosti na tyto kategorie:

- Minidružice – hmotnost menší než 1000 kg,
- Mikrodružice – hmotnost menší než 100 kg,
- Nanodružice – hmotnost menší než 10 kg,
- Pikodružice – hmotnost menší než 1 kg,
- Femtodružice – hmotnost menší než 0,1 kg.

Jiné podrobnější rozdělení používá například NASA pro kategorii standardu CubeSat (<https://www.nasa.gov/content/what-are-smallsats-and-cubesats>):

- Minidružice: 100-180 kilograms
- Mikrodružice: 10-100 kilograms
- Nanodružice: 1-10 kilograms
- Pikodružice: 0.01-1 kilograms
- Femtodružice: 0.001-0.01 kilograms

Malé družice CubeSat používají uspořádání se skládáním základní jednotky označované U1 (pikodružice o hmotnosti 1 kg)) do konfigurací uvedených na obr. 8.



Obr. 8 Konstrukční modulové uspořádání malých družic typu CubeSat

Pro vymezení pojmu malé družice se používá skupina charakteristických znaků:

- a) krátká doba jejího vývoje,
- b) vývojové týmy o malém počtu osob,
- c) rozsahem malá vývojová a testovací infrastruktura,
- d) přijatelné investiční náklady na vývoj, konstrukci, vypuštění a provoz,
- e) využívání nízké oběžné dráhy (LEO) do 1500 km na Zemi,
- f) krátká doba jejího provozu od několika měsíců do 3 let.

Malou družici lze rovněž pro naše potřeby v obecném a shrnujícím smyslu vyjádřit následovně:

Malá družice je umělé těleso využívající kosmický prostor na nízkých drahách, které je malé svými rozměry a hmotností, je vyrobené rychle a levně a má krátkou dobou životnosti.

Nyní si v základních rysech povšimneme jednotlivých výše uvedených charakteristických znaků malé družice. Podrobněji pak budou probány v dalších samostatných kapitolách.

Ad a) Krátká doba jejího vývoje

Dobu vývoje malé družice lze podstatně zkrátit použitím běžných komponent na trhu (baterie, materiál na výrobu antén, rádiové vybavení, ...), koupí už hotové a otestované stavebnice malé družice a výrobou vlastních komponent například na 3D tiskárně. To jak pro vlastní stavbu družice, tak jejího payloadu v podobě různých technologických nebo vědeckých experimentů. Dalšího zkrácení vývoje lze dosáhnout omezením doby a počtu předstartovních testů (testbed).

Ad b) Vývojové týmy o malém počtu osob

Dostupnost běžných komponent, stavebnicová konstrukce a malé rozměry a hmotnost malé družice (zvláště kategorie nano, piko a femto) umožňují realizace projektů vytvářené týmy o malém počtu osob s vyhraněnou specializací. V průběhu celého procesu od plánování až po provoz se tyto týmy mohou flexibilně měnit a současně se zapojovat do více projektů. Což je velice vítané, zvláště pro různé školní týmy jak v oblasti vlastní stavby malé družice, tak nesených experimentů. Rovněž tak je tu možnost zakládání start up, malých a středních podniků na vývoj, výrobu a prodej komponent do stavebnic malých družic.

Ad c) Rozsahem malá vývojová a testovací infrastruktura

Použitím běžných komponent jejichž funkčnost je již otestována a vzhledem k předpokládané krátké době životnosti lze podstatně zkrátit dobu vývoje prototypu a počet testů. Pro testy není třeba vysoce specializovaných a drahých měřicích přístrojů a testovacích zařízení, včetně pronájmu specializovaných certifikovaných laboratoří. Zůstává tak nutnost je předstartovních testů podle požadavků poskytovatele vynesení malé družice na oběžnou dráhu.

Ad d) Přijatelné investiční náklady na vývoj, konstrukci, vypuštění a provoz

V návaznosti na výše uvedené a díky novým možnostem, zapojením privátního sektoru do vynášení malých družic a vlastně i stanici ISS s technickou platformou pro vypuštění malých družic jsou vytvořeny příznivé podmínky pro snížení potřebných finančních prostředků i na realizaci malých školních projektů. Je však zřejmé, že bez ohledu na typ malé družice se budou náklady pohybovat v řádově desetitisíců amerických dolarů.

Příznivou skutečností z hlediska financování je, že díky možnosti vynášení většího počtu malých družic při jednom startu nosné rakety se náklady na vypuštění rozdělí mezi více subjektů. Rovněž tak možnost přidání do payloadu při vyslání velkých družic sníží finanční náklad. Zejména u školních projektů a pro potřeby výuky jsou poskytovány i značné slevy.

Rovněž malá družice nepotřebuje pro svůj provoz nákladnou pozemní stanici (nebo více záložních stanic). Prakticky lze použít radiostanice amatérské služby doplněné vhodnými předzesilovači spolu s otáčecími směrovými anténami. To vše je běžně k dostání na trhu v ceně kolem do 200 000 Kč.

I když pojem „přijatelná výše“ se může zdát jako dost vágní. Navíc se jedná o financování rozložené v čase. Sice je to u těchto misí řádově v měsících, ale během této doby se může stát například, že dojde ke změnám ve finančních podpoře u investorů, raketa neodstartuje v plánovaný čas, nepodaří se umístit malou družici na plánovanou oběžnou dráhu, nevysunou se jí antény nebo fotovoltaické panely, porouchá se radiokomunikační zařízení atd.

Ad e) Využívání nízké oběžné dráhy (LEO) do 1500 km na Zemi

Malé družice, které jsou předmětem tohoto materiálu, se pohybují na nízkých oběžných drahách (LEO) a většinou mají charakter polární dráhy (přelétávají na zemskými póly).

Použití nízké oběžné polární dráhy umožňuje globální pokrytí (komunikaci) mezi 98° severní a 98° jižní šířky. Malá družice tak nevyžaduje nést na palubě například výkonné radiokomunikační prostředky, které jsou tak levnější. Vysílání s menšími výkony kladou i nižší nároky na akumulátorové baterie a tím také na výkon fotovoltaických článků. Rovněž lze použít i levnější anténní systémy s menší hmotností.

To vše vede k tomu, že se zvětší prostor pro umístění více experimentů. Rádiový signál má díky krátké dráze šíření i nízké zpoždění (nízkou latenci). K tomu je třeba připočítat možnosti, které dává vypouštění malých družic ze stanice ISS.

LEO oběžné polární dráhy však s sebou nesou jednak krátkou dobu možnosti komunikace s malou družicí kolem 10 minut a dobu oběhu v závislosti na výšce od zhruba 80 do 130 minut. To na pozemní stanici vyžaduje použití otáčejících se směrových antén a eliminaci Dopplerova efektu. Ten způsobuje, že v průběhu přeletu dochází k posunu vysílacího a přijímacího kmitočtu. To vyžaduje při sledování družice zajistit vzájemnou synchronizaci změn rotujících anténních systémů s nastavením kmitočtů rádiových vysílačů a přijímačů.

Add f) Krátká doba jejího provozu

Mise malých družic se obecně vyznačují krátkou dobou životnosti na oběžné dráze. To jednak plánovaně nebo neplánovaně. Plánovaně je například u školních projektů běžně doba provozu do jednoho roku. Maximálně se předpokládá do tří let.

U neplánovaného ukončení mise po jejím úspěšném startu může být způsobeno neumístěním nebo předčasnou ztrátou oběžné dráhy, vlivem použití běžných komponent jako například běžných Li-Ion akumulátorových baterií z mobilních telefonů nebo poruše rozevření fotovoltaických panelů nebo antén, chybou v letovém software atd. Může tak dojít k jejímu podstatnému zkrácení. Těch příčin může být ovšem celá řada. Některým se budeme věnovat podrobněji v dalších kapitolách.

Pro porozumění dalšího výkladu bude užitečné uvést některé teoretické poznatky související obecně s pohybem umělých objektů v kosmu. Dále s parametry, které jsou předmětem plánování a praktické realizace misí malých družic a budou podrobněji diskutovány v dalších kapitolách.

V závislosti na letové výšce se používá následující rozdělení oběžných drah na:

- a) nízká oběžná dráha LEO (Low Earth Orbit): 160 – 2000 km (viz obr. 7), tu využívají malé družice (CubeSat, Orbcomm, meteorologické družice, senzorické monitorování Země,...) a je to předmětem tohoto materiálu,
- b) střední oběžná dráha MEO (Medium Earth Orbit): 2000 – 35 786 km, telekomunikační (mobilní sítě Inmarsat, Iridium, Global Star), navigační (GPS, Galileo, Glonass, Beidou), senzorové monitorování, ...
- c) Vysoká orbitální dráha HEO (High Earth Orbit): větší jak 35 786 km, zřídka užívaná,
- d) Vysoké eliptické dráha HEO (Highly Elliptical Orbit): nejbvzdálenější bod na dráze družice (apogee) je větší jak 35 786 km (převážně ruské telekomunikační služby Molnia)
- e) Geostacionární dráha GEO (Geostationary orbit)- více jak 35 786 km, telekomunikační (TV a R vysílání, pevné družicové datové služby – Internet,...)
- f) Měsíční dráha: více jak 384 401 km (sondy a mise k Měsíci a planetám)

Tvar dráhy a pohybu umělých objektů - družic v kosmu se obecně řídí třemi zákony formulované Johanem Keplerem v letech 1609 až 1619. Ty popisují zákonitosti pohybu planet kolem Slunce a jsou aplikovány na pohyb družic kolem Země.

Z prvního zákona („zákon drah“) vyplývá, že družice se pohybují kolem Země po drahách tvaru elipsy.

Z druhého zákona („zákon ploch“) plyne, že opsané plochy při pohybu družice kolem Země za stejný čas jsou shodné.

Třetí zákon („zákon doby oběhu“) uvádí, že druhá mocnina doby oběhu družice (T) je rovna třetí mocnině délky hlavní poloosy její dráhy. Pro zpřesnění tohoto vztahu se používá standardní gravitační parametr μ zahrnující vliv Země.

Platí vztah: $\mu = 4 \cdot \pi^2 \cdot a^3 / T^2$ a – délka hlavní poloosy elipsy (1)

Z tohoto vztahu lze pak vypočítat například dobu oběhu T_0 malé družice:

$$T_o = \sqrt{(4\pi^2 a^3 / \mu)} \quad (2)$$

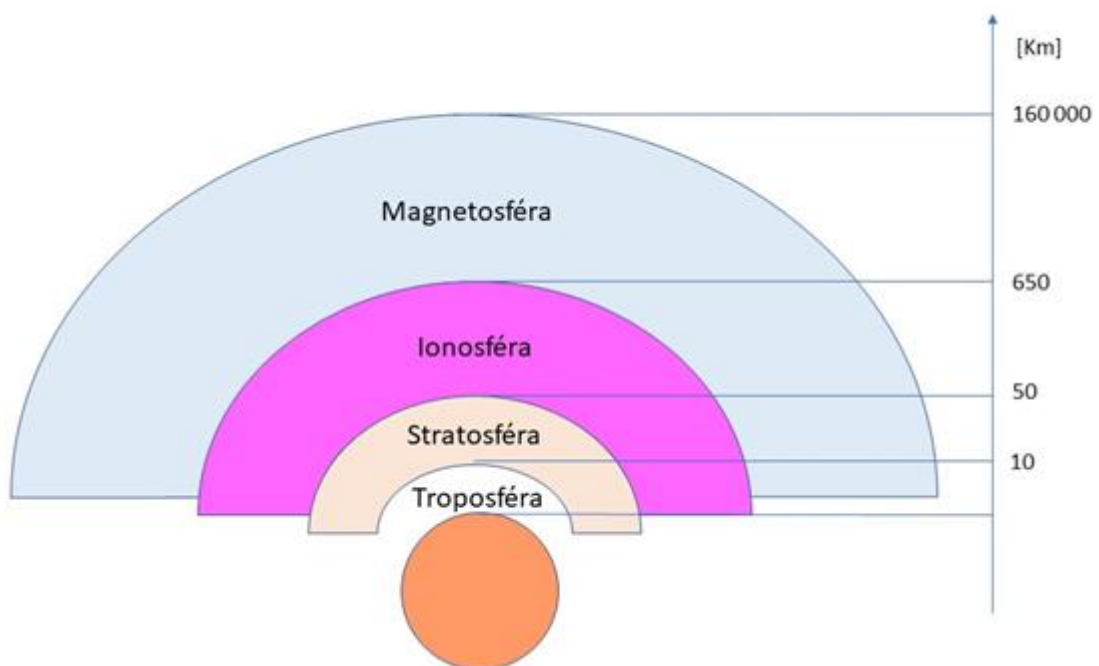
Kde μ je součin gravitační konstanty G a hmoty M a je roven 3.986×10^{14}

Z výše uvedených zákonitostí jsou odvozeny a používány následující Keplerovy elementy:

- odklon (vyosení) od kruhové oběžné dráhy (excentricita)
- hlavní poloosa elipsy (semi-major axis)
- inklinace (sklon)
- argument nejbližšího bodu dráhy družice vůči Zemi – „perigeum“
- argument nejvzdálenějšího bodu družice vůči Zemi – „apogeum“
- rektascenze na vzestupném uzlu dráhy

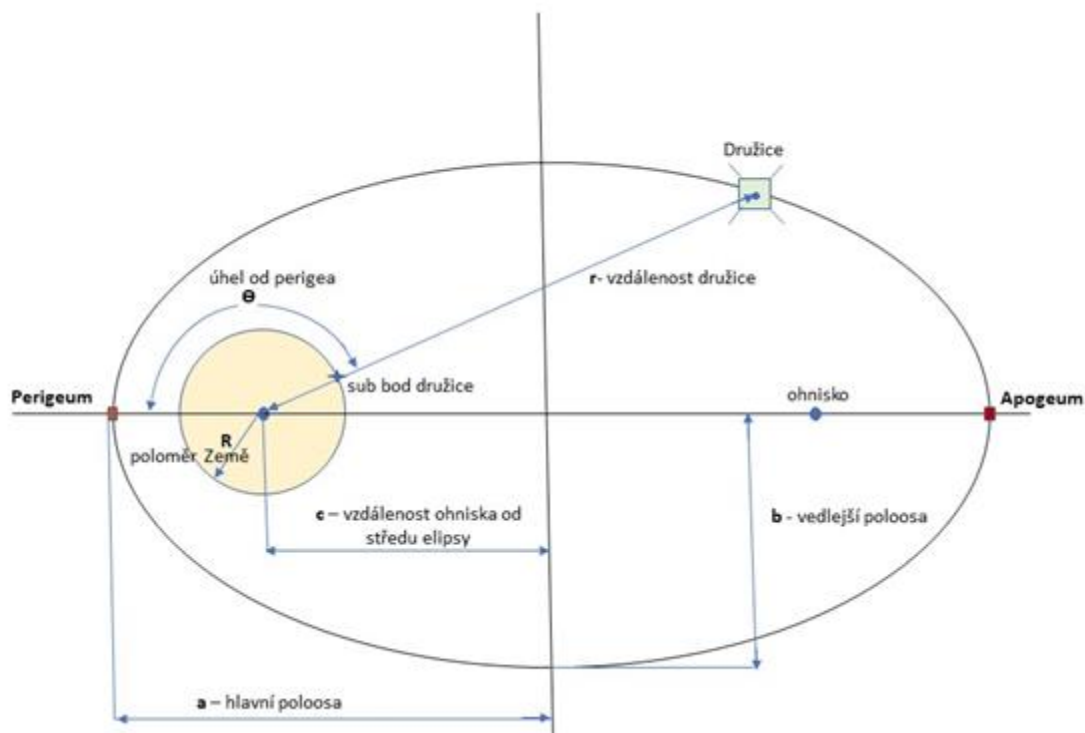
K tomu se přiřazují ještě dva doplňující elementy používané pro předpověď a sledování pohybu družice, kterými jsou:

- Epoque – kalendářní údaje (den, měsíc, rok)
- Družicový drag - síla působící proti pohybu družice vlivem jejího pohybu v prostředí, které klade odpor. Toto je významné právě v případě LEO drah. LEO dráhy zasahují do horních vrstev ionosféry a do magnetosféry (viz. obr. 7). Ve svém důsledku to způsobuje postupné zpomalování družice a tím odklon od její oběžné dráhy (kde by se jinak pohybovala do nekonečna) směrem do atmosféry. Důsledkem je její zánik shořením v horních vrstvách atmosféry.



Obr. 9 Vrstvy atmosféry Země

Pohyb družice a vzájemné vztahy, které budou v dalším výkladu používány jsou znázorněny na obr. 10 spolu s příslušnými základními vztahy.



Obr. 10 Pohyb družice kolem Země

Platí tyto vztahy:

$$\text{Excentrita oběžné dráhy } E: E = \sqrt{1-(b/a)^2} \quad 0 \leq E < 1 \quad (3)$$

Pro vzdálenost apogea r_a a perigea r_p od geocentra Země platí:

$$r_a = a(1+E) \quad [\text{km}; \text{km}] \quad (4)$$

$$r_p = a(1-E) \quad (5)$$

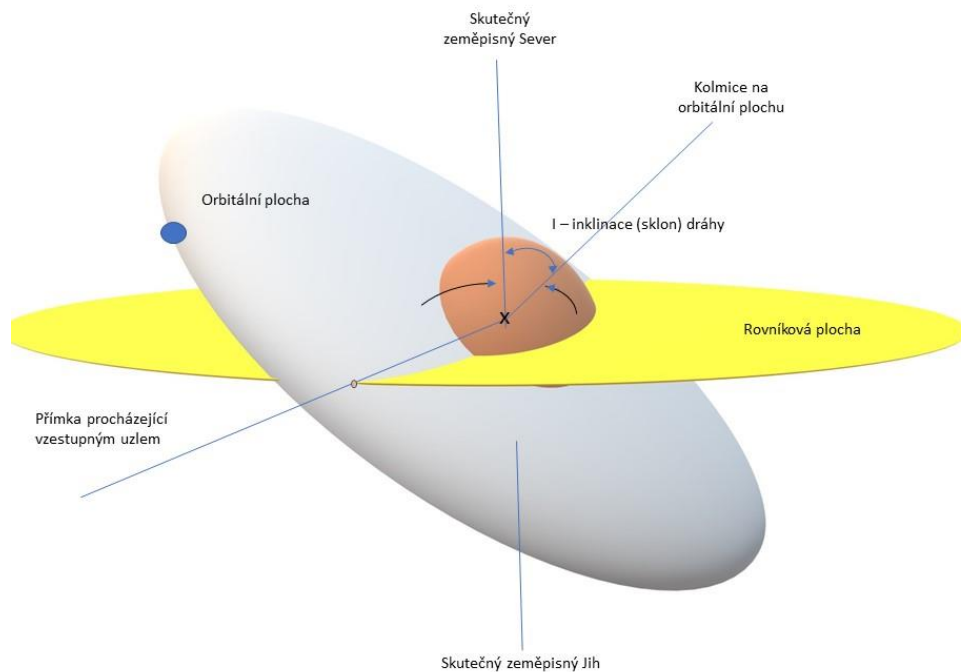
Dobu (periodu) oběhu T_0 lze vyjádřit již dříve uvedeným vztahem (1).

Pro rychlost na oběžné dráze v_0 , která je obecně proměnná platí vztah:

$$v_0 = \sqrt{GM(2/r) - 1/a} \quad [\text{m/s}; \text{m}] \quad a - \text{délka hlavní poloosy} \quad (6)$$

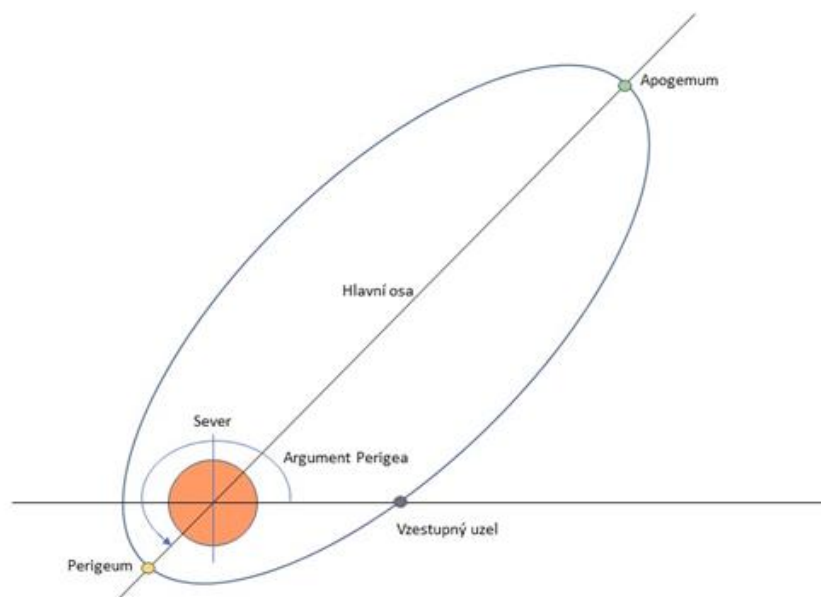
Kde GM je součin gravitační konstanty G a hmoty M a je roven 3.986×10^{14}

Pro vyjádření pohybu družice na oběžné dráze se používá řada dalších parametrů jejichž souvislosti jsou patrné z obr. 11 až 13. Parametr inklinace dráhy je znázorněn na obr. 11 a může nabývat hodnoty $0^\circ - 90^\circ$ a $90^\circ - 180^\circ$.



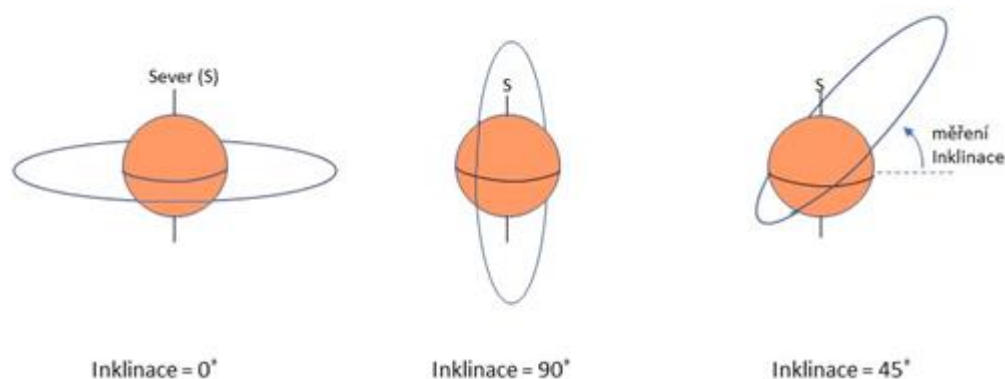
Obr. 11 Zobrazení inklinace oběžné dráhy

Dalším udávaným parametrem oběžné dráhy je argument perigea, který je zobrazen na obr. 12.



Obr. 12 Grafické vyjádření argumentu perigea

Příklady oběžných drah pro inklinace 0° , 90° (polární dráha) a 45° jsou uvedeny na obr. 13.



Obr. 13 Příklady inklinací oběžných drah 0° (rovníková dráha), 90° (polární dráha)

Malé družice kategorie nano, piko a femto většinou využívají LEO drah s inklinacemi kolem $97^\circ - 98^\circ$. Inklinace větší než 90° má důsledek, že směr pohybu družice je v části dráhy proti směru otáčení Země. Země se otáčí od Západu na Východ, tedy proti směru otáčení hodinových ručiček.

Dalším důležitým parametrem družice je, jak velkou plošnou oblast na Zemi svým signálem pokrývá neboli, kde lze a jakou dobu s družicí komunikovat.

Aby bylo možné přijímat rádiové signály na pozemní stanici, kde její poloha je obvykle vyjádřena zeměpisnou šířkou a zeměpisnou délkou, tak se družice musí po určitý čas pohybovat nad zemským horizontem. Zde rozlišujeme opticky viditelný horizont a rádiový horizont.

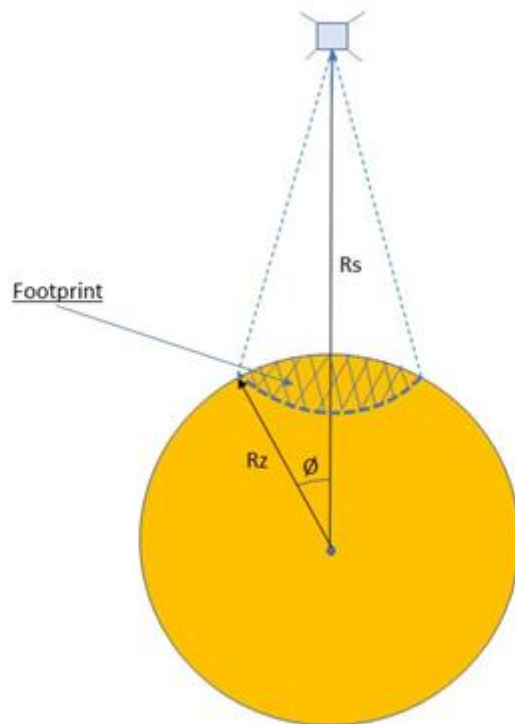
Protože se pro komunikaci s družicemi používají kmitočty nad 50 MHz, které se šíří podobně jako světlo na přímých drahách, tak při normálních podmínkách šíření je hodnota rádiového horizontu zhruba o 15% větší než u opticky viditelného horizontu.

Pro vzdálenost rádiového horizontu L_{rh} v závislosti na výšce antény h_a nad zemí horizont platí vztah:

$$L_{rh} = \sqrt{17} h_a \quad (8)$$

Při nízkých elevačních úhlech družice nad horizontem lze ve výjimečných podmínkách šíření dosáhnout větších vzdáleností než je tomu podle výše uvedeného vztahu (8).

Pokrytí rádiovým signálem z družice na zemském povrchu je označováno užívaným anglickým slovem „footprint“. Jeho znázornění je na obr. 14.



Obr. 14 Znáznornění pokrytí zemského povrchu rádiovým signálem družice – „footprint“

Maximum možnosti uskutečnění rádiové komunikace z pozemní stanice je možné vyjádřit následujícími vztahy pro velikost plochy S_f a průměr R_f footprintu.

$$S_f = 2\pi R_z^2 \times (1 - \cos(\phi)) \quad (9)$$

$$R_f = R_z \times \arccos(R_s / R_z) \times 2 \quad (10)$$

Výše uvedené charakteristiky a vztahy by měly dát základní představu o tom, co malá družice je a jak se pohybuje v kosmu. Je třeba mít na paměti, že jde o základní teoretické vztahy. V nich nejsou ve skutečnosti zahrnuty další vlivy a anomálie, které je v reálných podmínkách nutné zahrnout. Avšak, pro naše účely úvodu do problematiky malých družic, je nemusíme brát zatím v úvahu.

Samozřejmě při plánování projektu vlastní mise je nutné se jimi zabývat a rovněž definovat řadu dalších doplňujících parametrů, z nichž některé významné budou postupně popsány v dalších kapitolách.

1.4 Technologie malých družic – stavba, užitečný náklad, testování a vynesení do kosmu

Jak už bylo dříve napsáno, tak rozvoj malých družic byl výsledkem příchodu moderních technologií pro stavbu družic a jejich užitečného nákladu - payloadu, vypouštění a řízení jejich provozu pomocí moderních radiokomunikačních technologií. To spolu se změnami ve struktuře kosmického průmyslu, jeho inovacích a díky participaci soukromého sektoru a zaváděním vyšší míry standardizace. V této souvislosti se hovoří o konceptu nazvaného „nový kosmický průmysl“ (New Space Industry) nebo také „nová kosmická společnost“ (New Space Company), který se stal v posledních letech výrazným fenoménem a umožnil mise malých družic.

To vše ve své podstatě umožnilo výrazně snížit celkové náklady v celém procesním řetězci od návrhu mise až po její realizaci díky možnostem pro urychlení přípravy a snížení finančních nákladů misí a tak zpřístupnit využívání kosmu daleko širšímu okruhu zájemců než tomu bylo v minulosti.

Zásadním aspektem je, že na rozdíl od minulosti současné mise malých družic pohybujících se na LEO drahách nejsou navrhovány jako dlouhodobé a nevyžadují nákladná opatření pro zajištění vysoké spolehlivosti jejich komponent jak vlastní družice, tak jejich payloadu. Rovněž moderní a většinou běžně dostupné digitální radiokomunikační technologie založené na softwarovém rádiu (SDR) umožňují realizovat spolehlivou komunikaci pro řízení provozu a sběr telemetrických dat a dat z experimentů.

To vše nakonec otevřelo dveře i malým univerzitním a školním týmům v oblasti vývoje, aplikací a nakonec i výroby standardizovaných komponent, jak bude popsáno i v dalších kapitolách.

V této kapitole se budeme věnovat problematice návrhu a stavby návrhu malé družice včetně jejího užitečného nákladu a způsoby a možnostmi jejich vypouštění do kosmu. To se zaměřením na kategorii nanodružic a pikodružic, případně femtodružic využívajících LEO oběžných drah. Problematiku payloadu v podobě vědeckých a technologických experimentů bude předmětem dalších samostatných kapitol.

Nano, piko a femto družice jsou realizovatelné jak z hlediska zajištění potřebných investic, tak realizace vlastní stavby a testování i pro školní týmy. A to ve všech fázích počínaje vlastní stavbou (výrobou) družice přes realizaci prostředků pro vědecké nebo technologické experimenty, testování až po zajištění startu a umístění na oběžné dráze.

Zatím se zde nebudeme zabývat záležitostmi spadajícími do oblastí administrativně – legislativní, zahrnující problematiku přidělení rádiových kmitočtových pásem pro komunikaci,

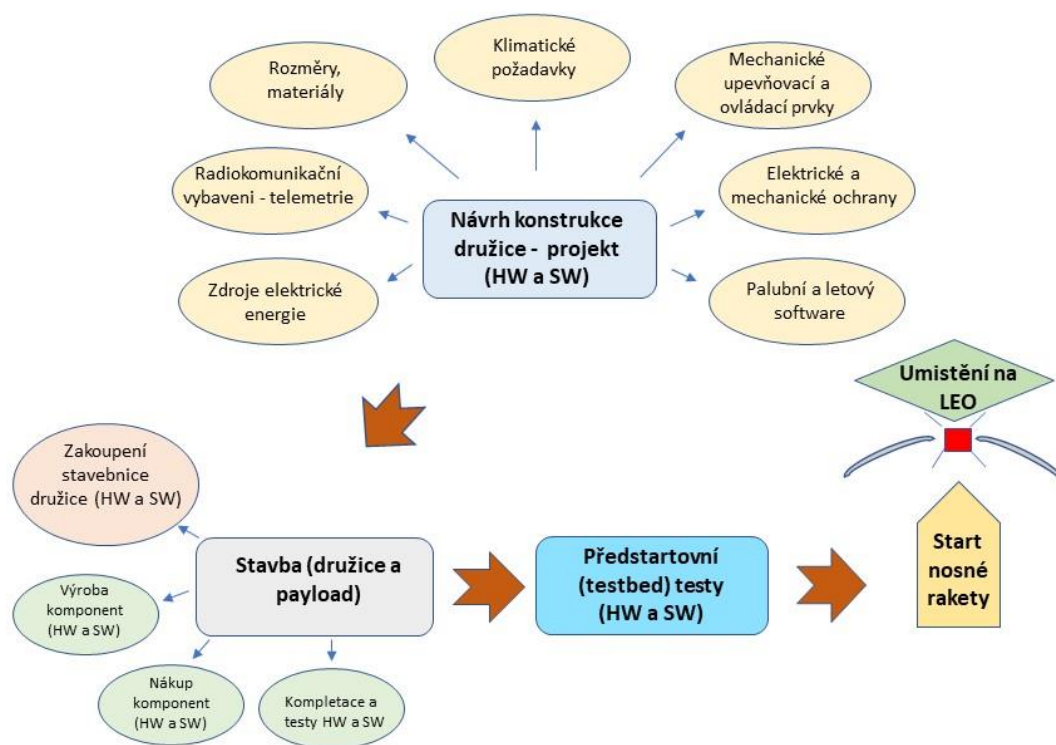
stavbou pozemní stanice, řízením provozu a opatřeními pro ochranu kosmu a ekonomickými záležitostmi. Rovněž tak problematikou spojenou s vytváření sítí malých družice. To bude předmětem samostatných kapitol.

Konstrukční návrh malé družice a jejího vybavení, včetně nezbytného software musí zajišťovat široký okruh požadavků vyplývajících z plánu mise.

V této kapitole budeme předpokládat, že se má realizovat projekt dané mise o jedné malé družici. Z plánu mise vyplývají konkrétní technické požadavky a parametry na konstrukci vlastní družice, jejích technologického a radiokomunikačního vybavení a na komponenty pro zajištění provozu jejího payloadu. Dále pak požadavky na vývoj palubního software (SW) a následně jeho integrace do celkového letového software. Při návrhu je nutné zahrnout požadavky technologické tak i letového software (rozhraní a komunikační protokoly) od subjektu, který bude zajišťovat její vypuštění. V případě, že provoz družice nebude řízen z vlastní pozemní stanice, pak bude nutné do letového SW zahrnout i požadavky provozovatele pronajaté pozemní družicové stanice.

K tomu samozřejmě patří jednotlivé funkční testy komponent, prototypu a letového modelu. Finální fáze je zakončena předáním letového malé družice subjektu, který bude zajišťovat vynesení do kosmu a umístění na plánované oběžné dráze.

Jednotlivé fáze a komponenty procesu od návrhu konstrukce až po vypuštění družice lze ukázat zjednodušeně na obr. 15.



Obr. 15 Fáze realizace mise malé družice

Proces realizace mise malé družice lze rozdělit na tyto etapy:

1. Návrh konstrukce družice a jejího vybavení

Návrh se skládá z technologické komponenty, kterou nazveme hardwarem (HW) a řídicí složkou pro ovládání mechanických a elektrických prvků obsaženou v palubním software (SW), který je modulem celkového – letového software. Jednotlivé dílčí komponenty návrhu jsou:

- požadované rozměry, hmotnost, materiály
- mechanické, upevňovací a ovládací prvky (upevnění částí experimentu, desek elektroniky, vysouvání fotovoltaických panelů a antén, kabeláž a její uložení, ...)
- radiokomunikační vybavení a použité kmitočtové pásmo (vysílač, přijímač, anténa, ...)
- způsoby řízení orientace, stabilizace a oběžných parametrů (žádný, magnetometr, akcelerometr, gyroskop, GPS, autonomní pomocný pohon – chemický nebo elektrický,...)
- požadavky na přenos telemetrických dat (teploty, stav baterií, ...) a dat z neseného payloadu (experimentu)
- zdroje elektrické energie a způsob jejich dobíjení

- klimatické požadavky na udržování teploty (velké rozdíly při osvětlení Sluncem zhruba do $+90^{\circ}\text{C}$ ve stínu Země do -30°C)
- elektrické a mechanické ochrany – elektromagnetické stínění, antivibrační konstrukce propojovacích prvků, konektorů, ...
- palubní SW a její HW jako subkomponenta letového SW

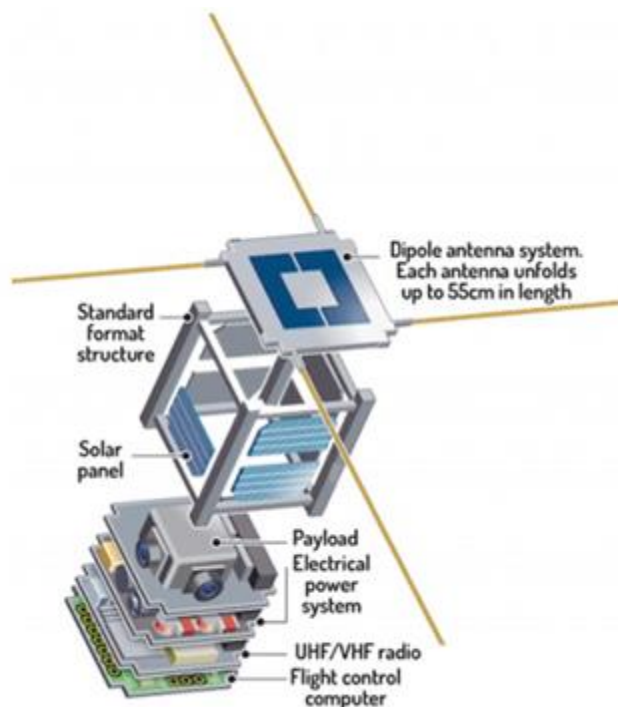
Pro výběr kategorie a vlastní stavbu družice musí být dále specifikováno:

- Délka mise s ohledem na její cíle – nesený experiment tvořící vlastní payload
- Volba parametrů oběžné dráhy – výška, druh (polární), doba oběhu, perigeum, apogeum, atd.
- Způsob a poskytovatel vypuštění malé družice a její umístění na zvolenou oběžnou dráhu – při stavbě malé družice je nutné respektovat infrastrukturu, materiálové a bezpečnostní požadavky a další podmínky toho, kdo provede její vynesení a umístění na zvolené oběžné dráze, mělo by být v době plánování známo a zajištěno
- Řízení provozu – pozemní stanice (lokality, vybavení, počet, pronájem, ...).
- Způsob zajištění bezpečného ukončení mise s ohledem na ochranu kosmu před kosmickým odpadem

Z posouzení uvedených komponent vyplyne jaká kategorie malé družice – nano, piko nebo femto bude muset být použita. Dále, zda se využije modulárního přístupu použitím standardizované platformy CubeSat nebo vlastního konstrukčního řešení.

Volba velikosti družice se prvotně odvíjí od požadavků neseného payloadu zahrnující jak vlastní experiment, tak požadavky na jeho zabezpečení. Současně se tím vymezují dimenze elektrických zdrojů a způsobu jejich dobíjení, které pak následně určuje i požadavky na velikost a výkon fotovoltaických panelů (často se užívá pojmu „sluneční“ popřípadě „solární“ panel). K těmto požadavkům na energetický rozpočet se dále následně zahrnou ostatní energetické požadavky zařízení a systémů vlastní družice.

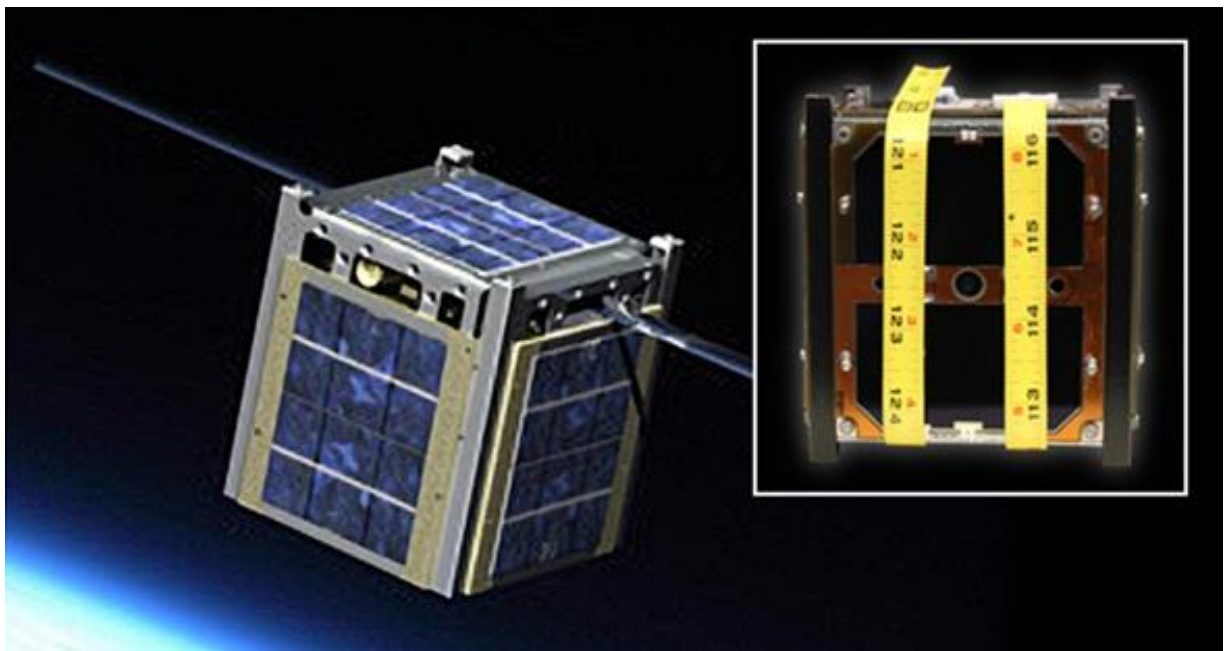
Pro představu jsou na obr. 16 zobrazeny základní komponenty malé družice [1].



Obr. 16 Příklad základních komponent malé družice CubeSat [1]

Z hlediska rádiové komunikace je třeba zajistit přenosy telemetrických o stavu jednotlivých komponent na palubě a data z neseného experimentu (download) a povely pro řízení systémů malé družice (označuje se jako TT&C) payloadu a (upload). Opět díky technologii softwarového rádia (SDR) lze dosáhnout malých rozměrů a nízké spotřeby elektrické energie.

Pro rádiovou komunikaci v nejčastěji používaných pásmech radioamatérské služby 145 MHz a 435 MHz, případně 2,3 MHz (S-pásmo) jsou na malé družici dokonce dostačující antény vyrobené z kovových pásků běžného pásma, jak dokladuje fotografie na obr. 17 nanodružice postavené v Montana State University ve spolupráci s NASA.



Obr. 17 Využití běžně dostupných komponent při stavbě malé družice – antény z kovového metrového pásma (NASA & Montana State University (USA))

Z hlediska investičních nákladů na misi bude nepochybně snahou použít co nejmenší rozměry a váhu. To však může být v protikladu s dalšími požadavky jako například zajištění dostatečného výkonu palubních akumulátorových baterií (Lion-lithiové), počtu fotovoltaických panelů (obvykle GaAs články), prostorové nároky elektrických nebo mechanických ochranných apod.

Obecně použití platformy - standardu CubeSat dává předpoklady pro jistý stupeň optimalizace investic v celém řetězci od návrhu mise až po její realizaci. To například díky tomu, že lze na trhu koupit jednotlivé moduly již otestované a obsahující i potřebný SW od renomovaných výrobců.

Na <https://blog.bliley.com/top-20-best-cubesat-satellite-manufacturers> je možné najít a vybrat si z nabídky předních dodavatelů technologií pro malé družice.

I zde však platí, že ušetřit za každou cenu může vést ve svém důsledku až k neúspěchu mise.

2. Stavba družice a jejího payloadu

Způsob zajištění jednotlivých fází realizace mise malé družice v kontextu dosažení co nejmenších investičních nákladů podle obr. 15 jak ve vlastním hardware, tak software může být provedeno několika způsoby:

Nákupem kompletní stavebnice nebo již sestaveného celku malé družice doplněné vlastní výrobou dílů navrženého payloadu. Snížení nákladu na vlastní výrobu dnes umožňuje použití moderních materiálů a technologií jako například zejména 3D tisku. Při použití platformy CubeSat (1 až 12) je na trhu velká řada dostupných a poměrně levných výrobků nebo součástek. Současně se tímto způsobem podstatně urychlí a tím sníží náklady na předstartovní fázi mise. Na trhu je celá řada výrobců a dodavatelů jako například Boeing.

Kombinaci nákupu jednotlivých dílů potřebných pro stavbu družice, doplněných vlastní výrobou a dalšími zařízeními běžně dostupnými na trhu (například SDR moduly přijímačů a vysílačů, akumulátorové baterie, robotické moduly nebo mechanismy pro vysouvání fotovoltaických panelů a antén, ...). Tyto běžné komponenty (také nazývané jako „off-the-shelf-components“) však nejsou certifikovány pro družicový provoz. Z toho vyplývá řada rizik s ohledem na jejich možnou nižší spolehlivost. Na druhé straně snižují náklady na stavbu vlastní družice.

Pro vývoj palubního SW lze využít řadu modulů knihoven podle HW včetně rádiové komunikace využívající standardizovaných protokolů. Příkladem může být radiokomunikační protokol – GOMX-3 (spin of společnost Gom Space), který využívá platforma nanosat CubeSat. Opět na trhu jsou dostupné již hotové desky SDR přijímačů s nainstalovaným SW, který lze začlenit do palubního SW. Toto bude podrobněji rozebráno v samostatných kapitolách.

U školních projektů převažují jednodušší technologické experimenty obsažené v payloadu jako například z oblasti sledování chování různých materiálů v podmínkách přetížení, odolnosti vůči vibracím a hluku při startu nosné rakety, snímkování zemského povrchu nebo sledování stavu jednotlivých vrstev atmosféry s maximálním využitím běžně dostupných a levných komponent. To ovšem také vede k tomu, že řada takových misí často vede k jejich neúspěchům.

3. Testování HW a SW malé družice

Pro úspěšnost mise je nezbytné naplánovat a provádět funkční testování jednotlivých komponent malé družice a jejího payloadu a jejich vzájemná součinnost. To jak z hlediska HW, tak palubního SW. Testování a stavba malé družice je kontinuální proces od stavby nebo pořízení komponent do prototypu a následně do letového modelu.

Volba druhů a způsobu realizace testů značně ovlivňuje danou položku v rozpočtu mise. Jak už bylo uvedeno dříve, tak mise malých družic díky své krátké době trvání, malých rozměrů družice, standardizaci a využívání běžné produkce, včetně náklady na výrobu a zejména použitím 3D tisku a testování včetně lidských zdrojů umožňuje náklady významně snížit.

Proces testování má obvykle tři fáze a částečně probíhá při stavbě malé družice. Testují se jednotlivé komponenty jak HW, tak SW malé družice, jejichž výsledky jsou shrnuty v protokolu CDR (Critical Design Review). Ve fázi prototypu se provádějí komplexní kvalifikační testy (viz obr. 17), jejichž výsledky jsou obsaženy v protokolu AIT (Assembly Integration Test). Výslednou fází jsou testy na provozním modelu, kde se ověřuje shoda s výsledky CDR. V případě úprav nebo změn v jednotlivých komponentách se musí celý proces zopakovat. Pokud vše proběhne úspěšně, tak se obvykle provozní model stává letovým modelem, který je předán subjektu zajišťujícímu vypuštění malé družice.

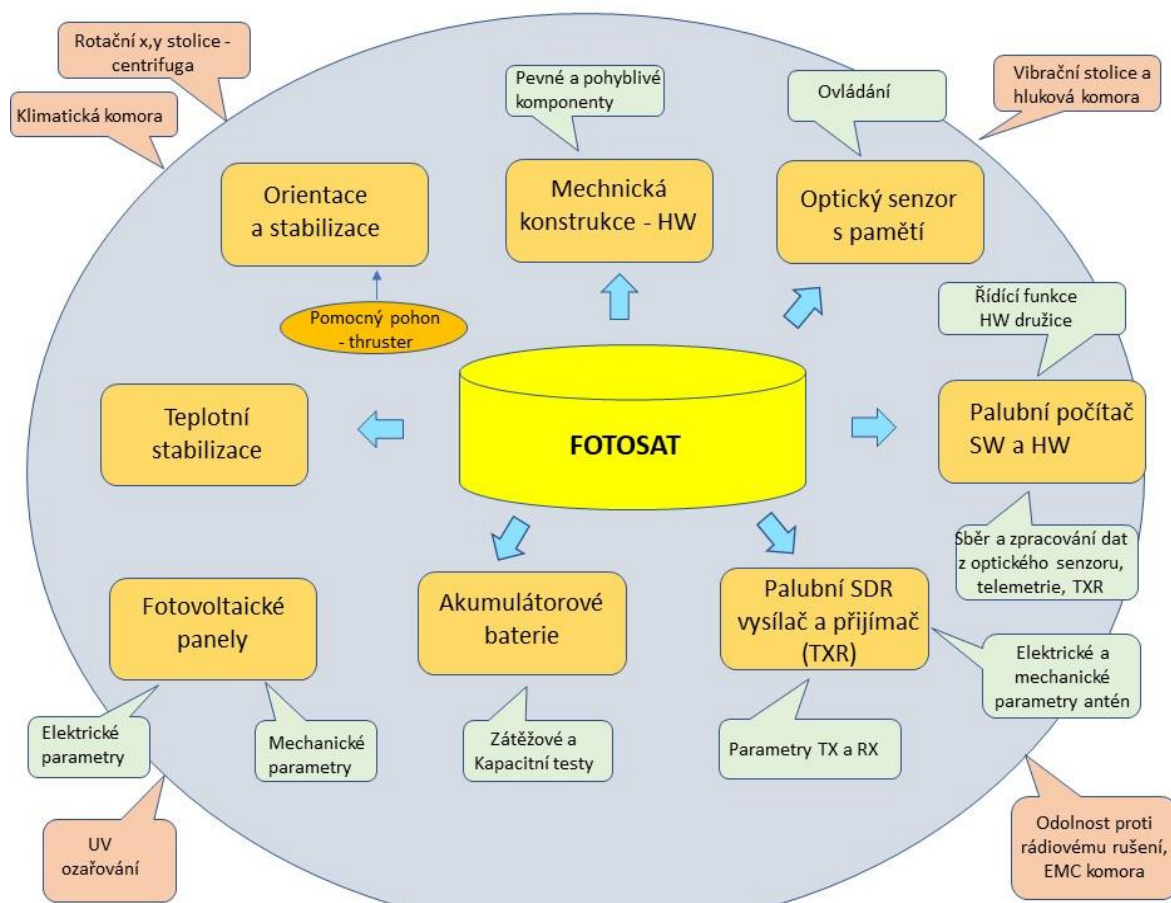
K vlastnímu testování lze využít vlastních prostředků (obvykle u malých školních projektů z finančních důvodů) nebo to svěřit dražším specializovaným laboratořím (např. Aerospace).

V návaznosti na tyto testy, je pak celá družice předávána subjektu, který zajišťuje vynesení a vypuštění malé družice k předstartovním testům.

Je zřejmé, že použitím vlastní výroby a běžně dostupných prvků, které nebyly vyvinuty a otestovány pro použití v kosmu se zvyšuje riziko neúspěšnosti mise. K potlačení tohoto rizika se často využívá postup, kdy se nejprve staví prototyp se základními komponentami a ty se ověřují dílčími testy, včetně modulů SW. V závislosti na výsledcích prototypových testů se řeší úpravy a výroba nových dílů a úpravy SW. Teprve až po úspěšném zakončení testů prototypu se staví finální malá družice (jedna nebo více), která je pak vyslána do kosmu.

K vývoji a testování prototypů mohou sloužit i specializovaná automatizovaná pracoviště vybavená 3D tiskárnami, robotickými systémy, klimatizační komorou, vibračními stoly atd. pro takzvané testbed testy. Pro malé družice existují i specializované simulační softwarové produkty (např. NASA NOS3 – bude podrobněji uvedeno v samostatné kapitole). Ty umožní podstatně zkrátit a zefektivnit vývoj mise i po finanční stránce a , snížit rizika částečný nebo celkový neúspěchu mise.

Na obr. 18 je uveden příklad možných testů, které by byly použity na pikodružici (název FOTOSAT), jejímž payloadem je experiment pro denní optické snímkování vybrané lokality na zemském povrchu při jejím přeletu.



Obr. 18 Příklad testů pikodružice FOTOSAT

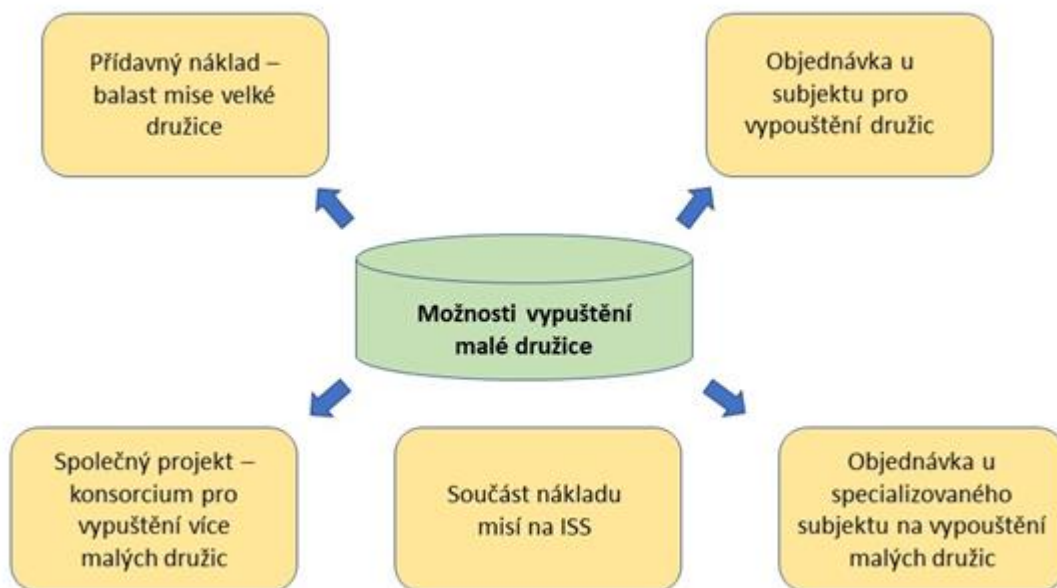
4. Vynesení a umístění malé družice

Zcela zásadním aspektem pro oblast malých družic je příchod řady privátních společností vedených například miliardáři Muskem, Allenem nebo Bezosem. Jejich společnosti mají k dispozici rakety, startovací zařízení pro vynesení mise malých družic do kosmu a jsou na tuto činnost specializovány.

Kromě vlastní nosné rakety jsou potřeba vhodně umístěné startovací plochy vybavené potřebným technologickým zázemím, které se nazývají kosmodromy. Například evropská agentura ESA používá nosných raket Ariane startujících ve Francouzské Guyane. Muskova společnost Space X pro start raket Falcon využívá kosmodromu NASA na Mysu Canaveral v USA. Další kosmodromy jsou v Kazachstánu, Indii, Číně, Japonsku a Austrálii.

K tomu je třeba připočítat i možnosti, kterou jsou dány existencí mezinárodní stanice ISS a jejím vybavením pro vypouštění malých požadované LEO oběžné dráze.

Vynesení malé družice je možné realizovat těmito způsoby, které jsou uvedeny na obr. 19.



Obr. 19 Možnosti vypouštění malých družic

Jako součást misí velkých družic v podobě jakéhosi přídavného nákladu – balastu. Tak tomu bylo například družic Intelsat Epic, Huges Network Sustems nebo Airbus. Tento způsob je využíván zvláště vypouštění většího počtu malých družice CubeSat. Rekordem je vypuštění 104 malých družic v roce 2017 (projekt Indian Space Research Organization a Polar Satellite Launch Vehicle) [1].

Tímto způsobem lze podstatně snížit náklady na vypouštění. Přináší to však rizika, která plynou z možnosti, že u dané mise dojde ke zpoždění startu, omezení hmotnosti balastu nebo je mise zcela zrušena.

Další možností je ustavení konsorcia více projektů nebo jednoho velkého projektu (viz evropský projekt CubeSat - QB 50) misí malých družic a provést samostatný start a vynesení na oběžnou dráhu u některé z kosmických agentur poskytující služby vypouštění družic (NASA, ESA -Ariane, ...).

V tomto případě lze opět snížit náklady na vypouštění, ale jsou zde rizika plynoucí z problémů spolupráce v daném konsorciu (neplnění termínů, závažné nedostatky v předstartovních testech, finanční problémy,...). Samozřejmě je tu i riziko zpoždění, že vlastní nosná raketa má technické problémy apod.

V současné lze využít i nově zakládaných privátních společností nebo agentur vlastnicích technologické platformy orientované na mise malých družic od nano až po femto. Příkladem mohou Arianespace ASAP, VESPA nebo známá Space X s raketami Falcon 9 a Dragon. Ty mají k dispozici technologická rozhraní (vypouštěcí zařízení) pro umístování malých družic

na LEO drahách. Pro pikodružice je to standardizované rozhraní pod názvem P-POD (Poly-Picosatellite Orbital Deployer).

To může být formou samostatné objednávky. Tento způsob se používá pro start mnoha malých družic tvořících určitou družicovou síť. Příkladem může být telekomunikační síť OneWeb pro globální přístup k internetu. I zde je využívána možnost společné objednávky konsorcia více misí, jako v předešlém případě.

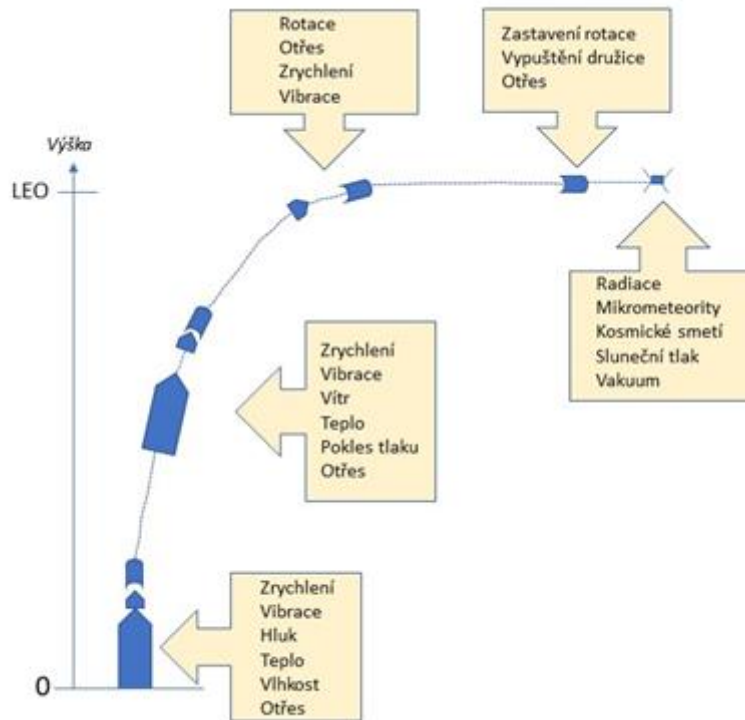
Omezení v případě konsorcií je ovšem v tom, že vybrané oběžné dráhy musí být shodné nebo velice blízké v závislosti na výkonnostních parametrech pomocného motoru (obvykle elektrického) malé družice, pokud ho ovšem má.

Rizika jsou v zásadě stejná. Ale díky tomu, že společnosti pro vypouštění družic a jejich technologické platformy se specializují přímo na malé mise, tak vynesení a ustavení na oběžné dráze dává předpoklady na dosažení nižších nákladů v této položce finančního rozpočtu mise.

Další možností, kde lze podstatně ušetřit náklady na vypouštění malé družice zvláště piko nebo femto, je využití startů raket (zásobovacích nebo s lidskou posádkou) k mezinárodní kosmické stanici ISS. Na ní je dnes už vybudovaná technologická platforma pro řízené vypouštění malých družic z jejich servisních modulů. Dříve se u piko nebo femto malých družic využívalo i vypouštění při výstupu kosmonautů na ISS do volného prostoru.

Vypouštění malých družic však v sobě vždy obsahuje riziko, že se malá družice nepodaří umístit na danou oběžnou dráhu a dodržet její pohybové parametry. To může vést k i tomu, že malá družice buď nenávratně zamíří do kosmického prostoru a stane se součástí dnes již existujícího značného kosmického odpadu nebo zamíří k Zemi a shoří v jeho atmosféře.

Pro představu, co vše na malou družici působí od jejího startu až po vlastní pohyb na oběžné dráze si lze udělat z obr. 20.



Obr. 20 Fáze a vlivy prostředí během umístění malé družice na oběžnou dráhu

Z něho je také patrné, co vše musí konstrukce a výroba komponent malé družice brát v úvahu. Rovněž tak, na co se musí zaměřit předstartovní testy.

V blízké budoucnosti lze očekávat, že budou vznikat a přicházet na tento segment družicového trhu další společnosti specializované na vypouštění malých družic v souvislosti s jejich stále širším používáním. Rovněž budou budovány nové kosmodromy, protože současné už jsou na hranici svých kapacitních možností. Pokud by tomu tak nebylo, tak by vlastně došlo v výraznému omezení jedné z výhod a smyslu této technologie. Tím je krátká doba realizace mise. S tím souvisí i krátká doba návratu finančních investic, která je určujícím prvkem plánu misí malých družic.

1.5 Síť malých družic

V předchozí kapitole jsme se zabývali základními aspekty spojenými se se stavbou a vypuštěním jedné malé družice.

Vypuštění jedné malé družice na LEO dráhy je obvyklé u školních projektů misí s různými spíše jednoduššími vědeckými nebo technologickými experiment. Nebo také cílem takové mise může být právě stavba a vypuštění družice.

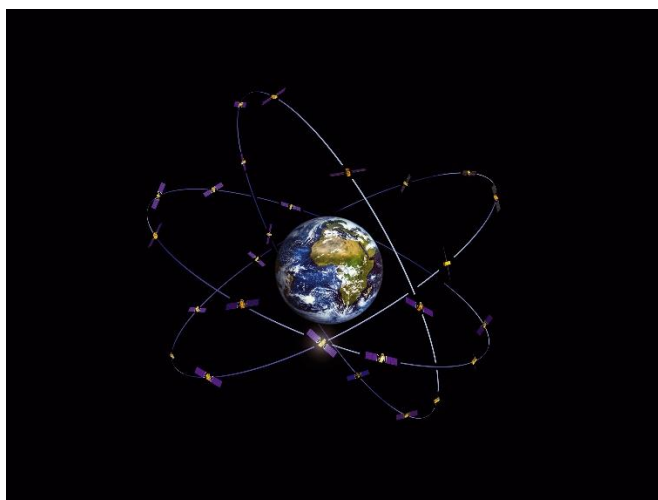
Nesmí se zapomenout na to, že v nejvíce používaných výškách LEO od 400 do 800 km je malá družice viditelná nad horizontem zhruba 10 minut každých 90 až 100 minut v případě polární oběžné dráhy.

Avšak největším potenciálem malých družic jsou jejich sítě, které zaručují potřebnou dobu viditelnosti a tedy i provozuschopnosti nesených aplikací (payloadu) po stanovenou dobu.

Každá síť nejen malých družic má zcela konkrétní uspořádání – architekturu na použitých oběžných drahách.

Pro architekturu sítě se používá pojmenování „konstelace“. V rámci dané konstelace se v závislosti na konkrétních aplikacích využívá různých geometrických uspořádání vycházející z požadavků.

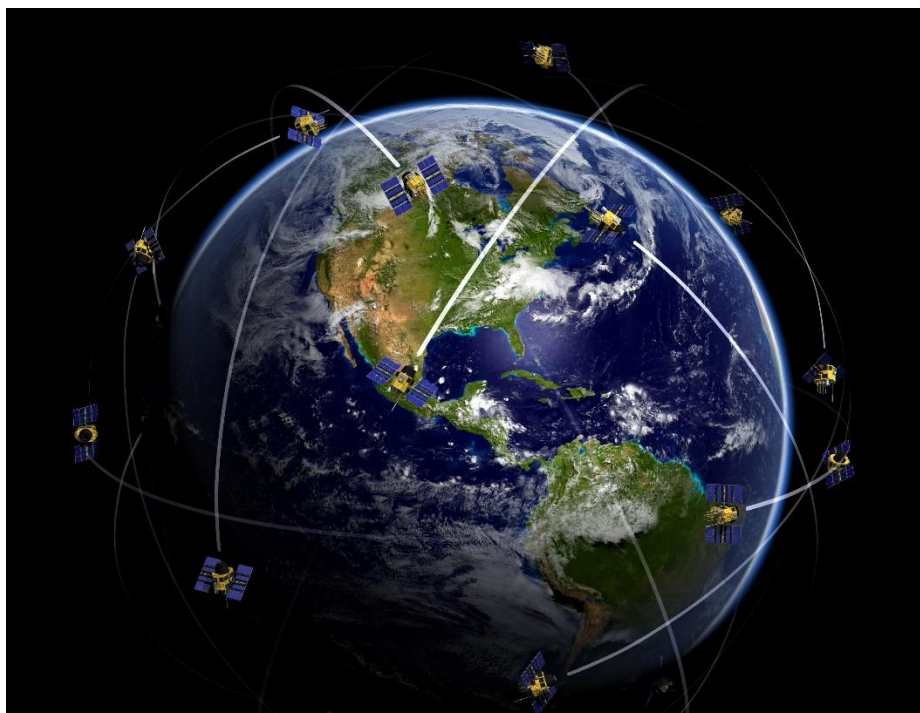
Například družicové navigační systémy je požadavek na nepřerušovaný příjem rádiových signálů v daném místě z minimálně třech družic (zeměpisná šířka a zeměpisná délka) s geometrickým rozložením umožňující dosáhnout požadované pravděpodobnosti nejistoty ve stanovení polohy (přesnosti měření s danou pravděpodobností na kruhové ploše pokrytí) kdekoliv na Zemi. Konstelace pro systém Galileo je na obr. 21[7].



Obr. 21 Konstelace družicového navigačního systému Galileo

Jiným příkladem je konstelace pro mobilní telekomunikační systém Iridium, která je na obr. 22 [7]. V této konstelaci je využito geometrického algoritmu Adams/Rider ‘streets of

Coverage známé jako „Walker Star Geometry“. Tato geometrie zaručuje globální pokrytí a dobrou rozmanitost v rozložení družic (diversitu) na zeměpisnými póly. Hůře je tomu kolem rovníků. Což je patrné i z obr. 22. Opět je zde požadavek na konstelaci pro nepřerušovanou dostupnost rádiového signálu. Tedy požadavek na dostupnost takové družicové mobilní sítě kdykoliv a kdekoliv a umožnění nepřerušovaného spojení (hlasového nebo datového).



Obr. 22 Konstelace mobilní telekomunikační sítě Iridium

Z výše uvedeného je zřejmé, že konstelace vychází primárně z požadavků dané družicové aplikace nebo družicové služby. S konstelacemi těsně souvisí i problematika využívání rádiového spektra a zajištění bezpečnosti a ochrany nejen vlastní sítě, ale i dalších umělých objektů v kosmu. Rovněž tak zajištění ochrany kosmu proti kosmickému odpadu. Ke zřejmé, že stále narůstající počet nejen malých družic s sebou přináší nutnost globálního přijetí odpovídajících technických a legislativních opatření (podrobněji viz další kapitoly)

Cíle a poslání misí malých družic a z toho plynoucí požadavky na konstelace jejich sítí jsou těsně provázány s jejich využitím. Příkladem existuje velké množství a lze je nalézt v bohaté literatuře jak zde uvedených referencích, tak s pomocí internetových vyhledávačů.

Pro naše potřeby se dále budeme věnovat dvěma významným oblastem uplatňujících se ve vědě, výzkumu, aplikacích a na kosmickém trhu. Nebudeme rozlišovat, zda jde to pro vojenské, bezpečnostní, špionážní nebo veřejné využití.

První oblastí je využití pro dálkové pozorování – optické a radarové snímání povrchu Země a měření fyzikálních parametrů a stavu v atmosféře na souši a na oceánech (dálkový senzoring, monitoring, meteorologické a hydrografické předpovědi, ...). Druhé pak pro telekomunikace (pevné a mobilní sítě, přístup do internetu). Obě lze považovat za jakousi základnu systémového řešení speciálně zaměřených sítí v konstelacích malých družic nebo na využívání získaných dat pro další využití ve všech druzích dopravy, pro „smart city“ projekty, ochranu životního prostředí.

V oblasti dálkového senzoringu lze historický vývoj do současnosti rozdělit do těchto etap.

Etapa 1.0

Byla doménou vládních agentur USA, bývalého Sovětského svazu a Evropy (ESA) a využívána pro vojenské, špionážní a bezpečnostní systémy. Například to byla série družic programu Landsat (Earth Resource Technology) v roce 1972, kterou lze považovat za mezník v éře civilního – veřejného pozorování Země. Dnes je v provozu síť Landsat 8.

Pro tyto účely se používaly družice s hmotností kolem 2 tis. kg, které se pohybovaly periodicky po polárních oběžných drahách se sluneční synchronizací, s třiosou stabilizací na LEO drahách ve výškách od 500 do 1500 km. Získaná data se posílala do pozemních stanic a dále do center, kde byla následně analyzovaná a distribuovaná dalším uživatelům.

V Evropě se k pozorování Země používaly družice ESA pod názvem Envisat. Postupně byly a jsou využívány i řadou dalších států.

Následná etapa 1.5 od roku 1994 zavedla snímkování s rozlišením kolem jednoho metr. umožnila komerční využívání získaných dat. Používané družice měly hmotnost do 4 tis. kg na polárních drahách ve výškách kolem 600 km.

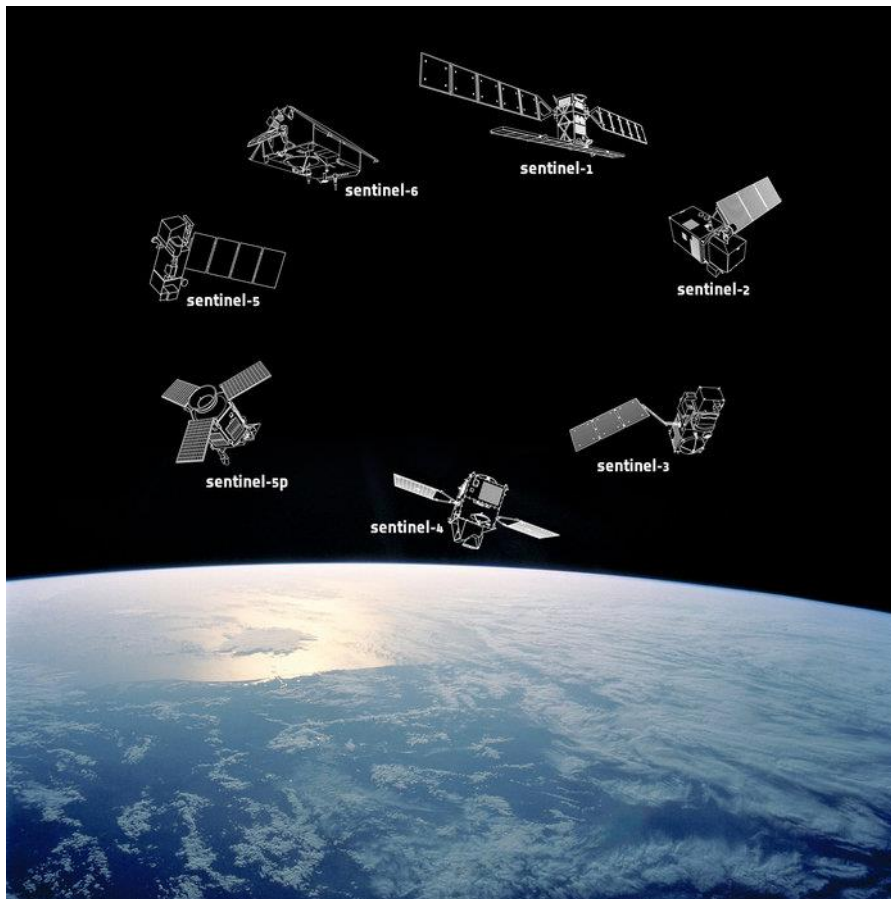
Mise těchto družic mají konec v roce 2012 a staly ve své podstatě nebezpečným kosmickým odpadem. Je to jistý důsledek toho, že v počátcích se neřešila problematika kosmického odpadu prostřednictvím řízeného odstraňování zaniklých malých družic na LEO dráhách.

Etapa 2.0

Je odrazem současnosti v technologii malých družic od micro do pico. Konstelace sítí těchto družic slouží zejména pro potřeby prevence a odstraňování následků přírodních katastrof s rozlišením kolem 50 metrů. Příkladem může být konstelace Disaster Monitoring Constellation (DMC) vyvinutá společností SSTL v roce 2002 a postupně vypouštěná do roku 2011. Tyto družice s hmotností do 90 kg umožňují snímkování ve třech spektrálních pásmech s rozlišením do 35 metrů. Jeden z příkladů využití bylo sledování a tvorba předpovědí trasy a síly hurikánu Katrina (USA) v srpnu 2005.

Trendem je přechod k využívání malých družic s hmotností od 15 kg do asi 200 kg s rozlišením kolem jednoho metru, které jsou realizovány prostřednictvím mezinárodních konsorcií a často se využívá principu sdílení. Příkladem je projekt společností Planet a její projekt Planet Sat, či univerzitní projekt SkyBox/Terra Bella (2009, Stanford University v Silicon Valley, USA) používající konstelaci z malých družic Cube Sat kategorie 6U (60 cm) umožňující snímkování s rozlišením jedno metru fotografií nebo videí. V konstrukci payloadu bylo využito dílů z mobilních telefonů a software Open Source.

Současný trend jde směrem k veřejnému bezplatnému využívání získaných dat se středním rozlišením z vládních sítí. Příkladem může být postupně se rozvíjející program Copernicus Earth Observation realizovaný Evropskou komisí a ESA s malými družicemi Sentinel 1 (radar) a Sentinel 2 (optické snímkování). Konstelace sítě zahrnující i její plánované rozšíření je na obr. 23.



Obr. 23 Konstelace sítě Sentinel (ESA)

Podrobnější informace o dalších konstelacích a projektech spojených s pozorováním Země lze nalézt v [1].

Další významnou aplikační oblastí malých družic jsou telekomunikace s aplikacemi pro mobilní sítě a přístup do internetu.

Již od počátku využívání kosmu byly vypouštěny družice poskytující telekomunikační služby datové nebo vysílací (rozhlas a televize). Ty využívaly především rovňkové geostacionární oběžné dráhy.

Mezi nejvýznamnější se řadí společnosti Intelsat, Inmarsat, Astra (dnes SES). Tyto družice měly životnost do 15 let. Tyto společnosti i dnes působí na kosmickém trhu a státy je využívají prostřednictvím přímých kontraktů nebo v rámci mezinárodních uskupení jako ITSO pro družicovou síť Intelsat, IMSO pro Inmarsat nebo evropské. Například společnost Inmarsat je provozovatelem jak rozhlasového a televizního vysílání, tak bezpečnostních a záchranných systémů v letectví a námořní dopravě a pro datové telekomunikační sítě. Významnou roli hrají i pro rozvojové a ostrovní státy, kde je problematické nebo neekonomické budování kabelových sítí nebo sítí pro pozemské rozhlasové a televizní vysílání a pro telekomunikační sítě. Tyto sítě mají významné infrastrukturní postavení i v ostatních státech světa. A to nejen ve vzdálených lokalitách, kde je nedostatečné pokrytí pozemskými rádiovými signály, nedostatečná kapacita telekomunikačních drátových nebo optických sítí.

Jejich společným jmenovatelem jsou vysoké náklady na jejich stavbu, vypouštění, provoz (v kosmickém i pozemním segmentu) a řízený zánik. S tím souvisí i potřeba obnovy družic a řešení zálohování, aby byly poskytovány nepřerušované telekomunikační služby. To zejména v případech, kdy jsou využity pro bezpečnostní a záchranné vojenské nebo veřejné (civilní) potřeby).

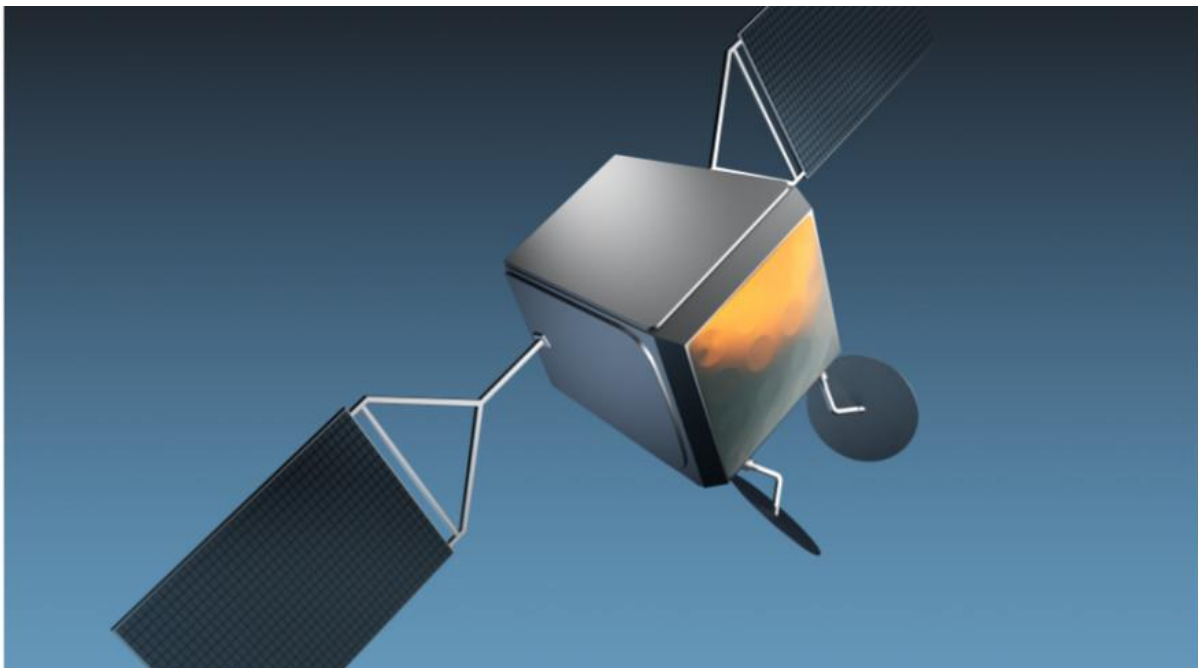
Je třeba také připomenout, že z hlediska místa na GEO rovňkových dráhách je poměrně těsně. Navíc s rostoucí hustotou geostacionárních družic se zvyšuje riziko nežádoucích rádiových interferencí a potřeba jejich potlačení a nutnost používání vyšších vysílacích výkonů v obou směrech. K tomu přistupuje i nežádoucí zpoždění signálů, což je zvláště patrné u hlasové (telefonní) služby.

Sítě malých družic na LEO oběžných drahách (například Iridium, Global Star, Orbcomm) jsou považovány za jakousi revoluci na tomto segmentu družicového trhu.

Přinášejí možnost jak podstatně snížit celkové investice do dané konstelace sítě a tím i předpoklady jak reagovat na požadavky trhu. To i díky možnosti využívat levnějších privátních společností (například Space X) pro jejich vypouštění. Snižují se celkové náklady na obnovu sítě. Díky menší vzdálenosti od Země než tomu je u geostacionárních družic není potřeba velkých vysílacích výkonů. Na pozemních stanicích lze používat levnějších moderních anténních systémů (fázových polí a jejich napájení a bez nutnosti mechanických sledovacích anténních systémů, ...).

Na druhé straně přináší řadu jiných problémů jako je potřeba většího počtu malých družic v dané konstelaci a většího počtu pozemních stanic pro řízení konstelací a k zajištění nepřerušovaného poskytování různých telekomunikačních služeb. Roste také riziko srážek a ztráty provozuschopnosti. Je třeba se vypořádat se synchronizací v rámci konstelace malých družic a potlačením Dopplerova efektu. Existuje zde vážný problém z hlediska potlačení nežádoucích rádiových interferencí mezi geostacionárními a orbitálními družicemi a jimi poskytovanými radiokomunikačními službami. To souvisí s problematikou regulace a správy rádiového spektra (podrobněji v dalších kapitolách).

Jako příklad sítě malých družic v oblasti telekomunikací může sloužit již dříve zmíněný projekt sítě OneWeb s konstelací 648 malých družic. Jeho cílem je poskytovat službu globálního vysokorychlostního přístupu k internetu a páteřní připojení (backhaul) mobilních sítí 5 generace. Při jednom startu bude vyneseno až 36 malých družic. Podle kontraktu společnost Airbus DS jich má vyrobit 900 kusů. Plně v provozu se předpokládá v roce 2020. Skica malé družice, kterou vyrábí společnost Airbus DS je na obr. 24.



Obr. 24 Skica malé družice pro síť OneWeb (Airbus DS)

Dalším příkladem možností poskytování družicových datových telekomunikačních služeb typu „store and forward“ a pro aplikace internetu věcí – IoT s globálním pokrytím na souši, na moři a v polárních oblastech pomocí sítě malých družic je kanadská společnost Kepler Communications poskytující (<https://www.keplercommunications.com/>).

Její cílová konstelace v roce 2022 bude složena ze 140 nanodružic CubeSat U3 a U6 s životností 5 roků je umístěna na polárních oběžných drahách ve výšce 575 km. K rtádiové a využívá Ku pásma (10,7 – 12,7 GHz pro downlink a 14,0 – 14,5 GHz pro uplink).

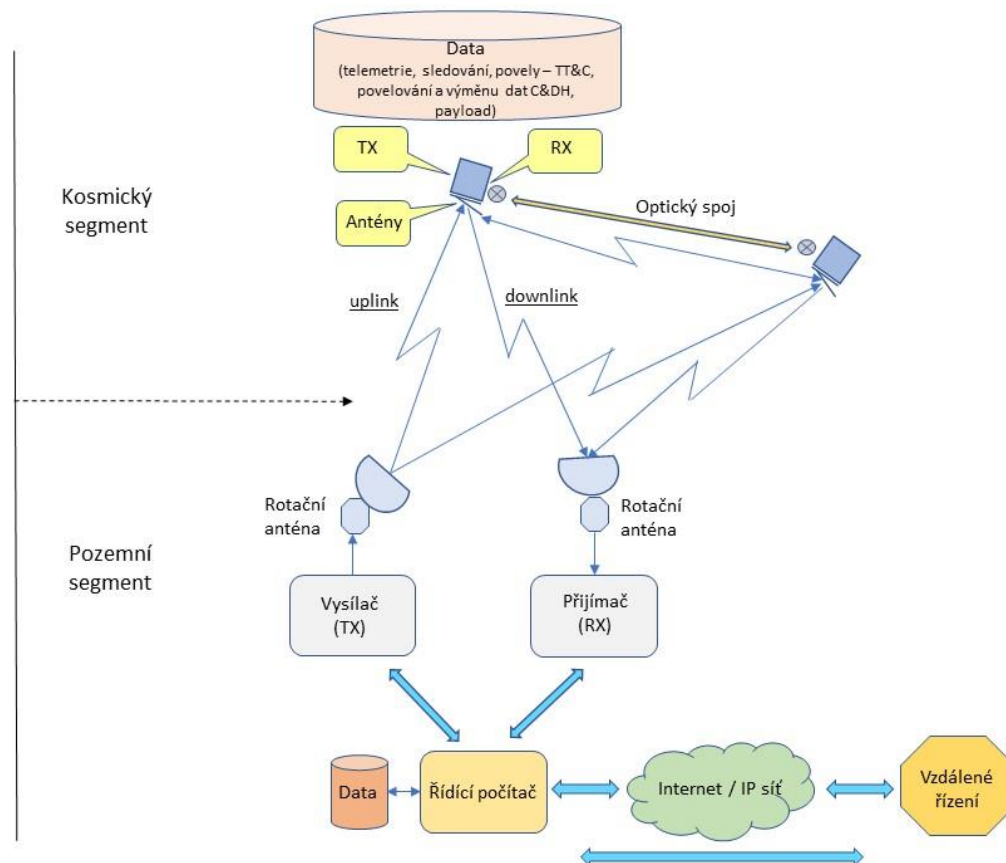
V současné době je v provozu nebo připravováno mnoho dalších komerčních a nekomerčních sítí s konstelacemi na LEO oběžných drahách pro různé účely. Situace na tomto trhu má dynamický charakter jak z pohledu šíře a druhů poskytovaných služeb, tak ve vzniku nebo zániku společností zejména typu malých a středních podniků nebo různých spin-off a start-up podniků. To vše zcela jasně dokumentuje perspektivu rozvoje využívání technologií a sítí malých družic.

Avšak růst počtu družicových sítí s sebou bude přinášet problémy, které je nutné řešit s dostatečným předstihem. Jedná se zejména o potlačení rizik kolizí na oběžných drahách a vlivem kosmického odpadu. Dále pak zajištění bezpečné a nerušené veškeré rádiové komunikace pro řízení sítí a jejich služeb, včetně zabránění nežádoucímu rušení dalších družicových radiokomunikačních služeb provozovaných v dotčených kmitočtových pásmech. Podrobněji to bude diskutováno v kapitole 1.7.

To vše si nepochybně vyžádá i řadu legislativních a regulačních opatření, která budou všemi zúčastňovanými respektována.

1.6 Rádiová komunikace a řízení provozu malých družic a jejich sítí

Pro řízení provozu malých družic je zcela zásadní zajištění bezpečné a spolehlivé komunikace pro telemetrii, sledování a povelů (TT&C – Telemetry, Tracking and Command) a payloadu (C&DH - Command and Data Handling (C&DH), včetně letového software) a data payloadu v celém řetězci sestávající z pozemního segmentu a kosmického segmentu. Na obr. 25 je uvedena zjednodušená struktura komunikačního řetězce sítě se dvěma malými družicemi.



Obr. 25 Struktura řetězce komunikace v pozemním a kosmickém segmentu malých družic

Datová komunikace probíhá podle standardizovaných nebo privátních protokolů s digitálním kódováním (více-stavové amplitudové - ASK, kmitočtové - FSK(MSK, GMSK) nebo fázové klíčování PSK - BPSK, QPSK) a přenosovými rychlostmi do 9 600 bit/sec. Tyto protokoly využívají různých bezpečnostních prvků pro korekci chyb nebo případně i šifrování. Příkladem mohou být standardy protokolů pro CubeSat (CubeSat Space Protocol) nebo sdružení The Consultative Committee for Space Communication (CCSDS).

Zakódované signály jsou v modulátoru vysílače namodulovány na nosný kmitočet a pomocí antény přenášeny prostorem. K tomuto účelu se používá buď frekvenční modulace nosné (FM),

modulace s jedním postranním pásmem (SSB) nebo dvoustavové amplitudové modulace označované jako CW.

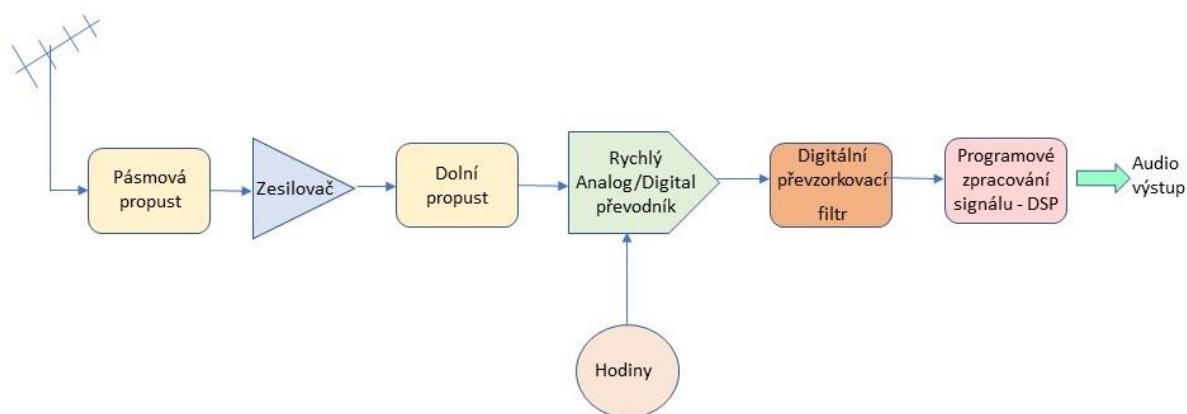
Opačný proces probíhá při příjmu (downlinku). Signál přijatý anténou přijímače je zesílen a v demodulátoru transformován zpět a předáván k dalšímu zpracování v řídicím počítači.

Vysílání (uplink) se realizuje prostřednictvím rádiového vysílače (TX) a příjem (downlink) rádiovým přijímačem (RX) na zvolených rádiových kmitočtech (více v další kapitole).

Pro rádiový přenos do a z kosmického segmentu (tj. předání signálu z výstupu vysílače do prostředí, kterým se šíří směrem k přijímači na malé družici a opačně) jsou nutné antény nebo jejich soustavy. Důležitými parametry antény jsou zisk (vyjádřený v dBi nebo dBd) a polarizace (orientace napěťové složky elektromagnetického pole šířeného signálu).

Vzhledem k tomu, že malá družice se při pohybu na oběžné dráze otáčí, tak pro zajištění maximální úrovně signálu je třeba použít kruhové polarizace (pravotočivé - RHCP nebo levotočivé - LHCP).

Konstrukce rádiových vysílačů a přijímačů pro malé družice používá technologii založených na principu softwarového rádia (SDR – Software Defined Radio) [9]. Blokové schéma pro případ nejnovější 4. generace SDR přijímačů, která se vyznačuje přímou konverzí vstupního vysokofrekvenčního rádiového signálu do zvukového (audio) pásma je na obr. 26.



Obr. 26 Blokové schéma SDR přijímače s přímou konverzí DDC

Předchozí generace SDR technologií využívaly směšování a kvadrurní demodulaci vysokofrekvenčního vstupního signálu na komplexní I/Q (signály jsou rozděleny do fázových (I) a kvadrurních (Q) komponent, které se liší fázově o 90 °) na nízkofrekvenční signál.

Pro SDR rádio existuje integrovaný obvod (chipset), který je možný například použít u dalších komponent HW malé družice nebo jako USB klíčenky (dongle) vložit do počítače na pozemní

stanici. Nejpoužívanějším chipsetem je asi RTL 28321U. Ten je využíván například i v TV tunelech pro pozemské digitální vysílání DVB-T.

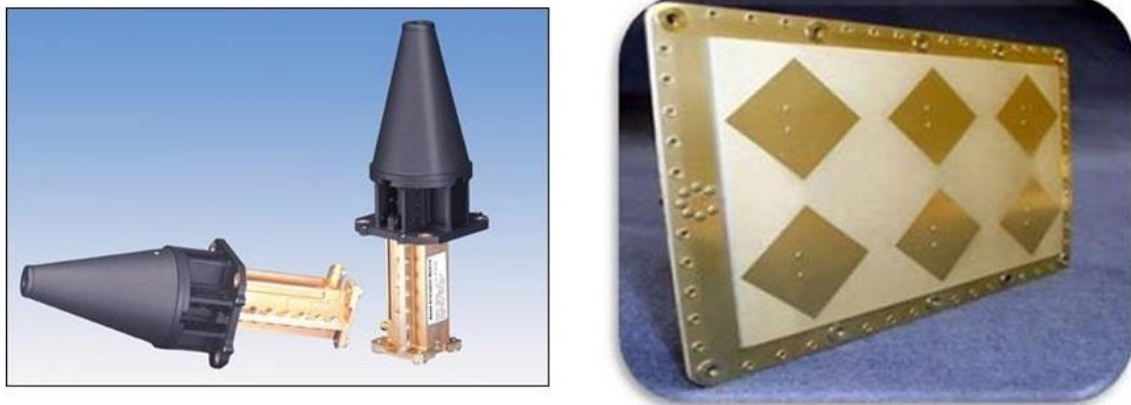
Kosmický segment

Kosmický segment je tvořen jednou malou družicí nebo jejich konstelací z více družic.

Rádiová komunikace z malé družice zajišťuje:

- příjem a zpracování povelů vyslaných na malou družici pro ovládání systémů vlastní družice, tak neseného payloadu (experimentu – ovládání, ukládání dat a sběr dat, ...),
- vysílání telemetrických dat o parametrech pohybu malé družice (TLE data – identifikace družice – jméno, NORAD číslo, poloha, rychlost, výška, orientace, argument perigea,...), stavu jejich vnitřních systémů (například stav napájecích zdrojů, vnitřní teplota, ...) a stavu vlastního neseného payloadu,
- předání dat z neseného payloadu – data z experimentů na palubě malé družice (výsledky měření, fotografické snímky, ...).

Na malé družici se vzhledem k omezeným rozměrům používají pro kmitočtová pásma nad 1 GHz mikropáskové antény uspořádané do matic jejich fázovým přepínáním se vytváří kruhová polarizace nebo antény typu helix. Pro nižší pásma pak čtvrtvlnné (monopole) prutové antény. Ukázky helix a mikropáskové antény jsou na obr. 27.



Obr. 27 Ukázka provedení helix antény (vlevo) a mikropáskové antény (vpravo)

S rostoucím počtem malých družic v konstelacích sítí stoupá potřeba zabezpečení spolehlivé a vysokorychlostní komunikace přímo mezi sebou a rovněž tak s pozemní stanicí. Což se zejména projevuje u konstelací pro telekomunikační služby. Limitujícím faktorem je nedostatek volných kmitočtů a s tím související problémy s potlačením nežádoucích interferencí mezi řadou služeb využívající též části rádiového spektra.

Proto v poslední době byla věnována velká pozornost využití světelného optického paprsku k přenosu dat. V roce 2018 společnost The Aerospace Corporation in El Segundo (USA – Kalifornie) ve spolupráci s NASA prokázala při misi dvou nanodružic o rozměrech 10 x 10 x 17 cm a pod názvem „The Optical Communication and Sensor Demonstration (OCSD)“ schopnost spolehlivé optické komunikace laserovým paprskem mezi sebou a s pozemní stanicí o rychlosti 100 Mb/sec. Předpokládá se možnost navýšení rychlosti až na 200 Mb/sec. To vytváří možnosti pro spolehlivější a bezpečnější přenosy většího množství dat, které lze využít i v řadě aplikací při zkoumání kosmu, snímkování Země a v dalších vědeckých experimentech vyžadujících přenosy velkého objemu dat [27].

Pozemní segment

Pozemní segment je tvořen jednou nebo více vzájemně propojenými pozemními stanicemi pro obousměrnou komunikaci s kosmickým segmentem družicové sítě.

Rádiová komunikace z pozemní stanice zajišťuje:

- vysílání povelů na malou družici pro ovládání systémů vlastní družice, tak neseného payloadu (experimentu – ovládání, ukládání dat a sběr dat, ...),
- příjem telemetrických dat malé družice (TLE data) a o stavu jejich vnitřních systémů (například stav napájecích zdrojů, vnitřní teplota, ...) a stavu vlastního neseného payloadu,
- přenos dat z neseného payloadu – data z experimentů na palubě malé družice (výsledky měření, fotografické snímky, ...).

Na pozemní stanici se pro kmitočtová pásma VHF a UHF převážně používají směrové antény typu YAGI, a ve vyšších pásmech nad 1 GHz parabolické antény.

Kruhové polarizace se dosahuje u antén typu Yagi soustavou dvou zkrížených antén a u parabolických antén provedením napájecího členu (ozařovače umístěného v ohnisku paraboly). Ukázka provedení anténního systému pozemní stanice je na obr. 28.



Obr. 28 Ukázka anténního systému pozemní stanice (vlevo zkřížená anténa YAGI pro pásmo VHF a vpravo pak pro pásmo UHF, uprostřed parabolická anténa pro S pásmo 1,23 GHz, elevační rotátor je uprostřed a celá soustava je na tyči upevněna do azimutálního rotátoru)

Vzhledem k tomu, že malé družice se pohybují na oběžné dráze, tak je nutné provádět směřování antén pomocí anténních rotátorů jak v azimutálním směru, tak v elevačním směru.

Součástí payloadu malých družic, kromě vědeckých a technologických experimentů, mohou být další rádiová zařízení (TX, RX) – transpondéry pro různé telekomunikační aplikace. Například u malých družic OSCAR pro radioamatérské služby to jsou opakovače (repeatery) pro hlasovou a datovou komunikaci, automatický sledovací systém ASTARS, ...).

To vše klade nároky na zajištění spolehlivé a bezpečné komunikace, anténní systémy s dostatečným ziskem a samozřejmě na velikost výkonu TX (běžně se vystačí s výkony do 100 W pro FM modulaci nosné). U přijímačů pak na jejich citlivost (potlačení šumových signálů) a odolnost proti nežádoucím interferencím. Obecně se dnes využívá především technologií založených na principu softwarového rádia.

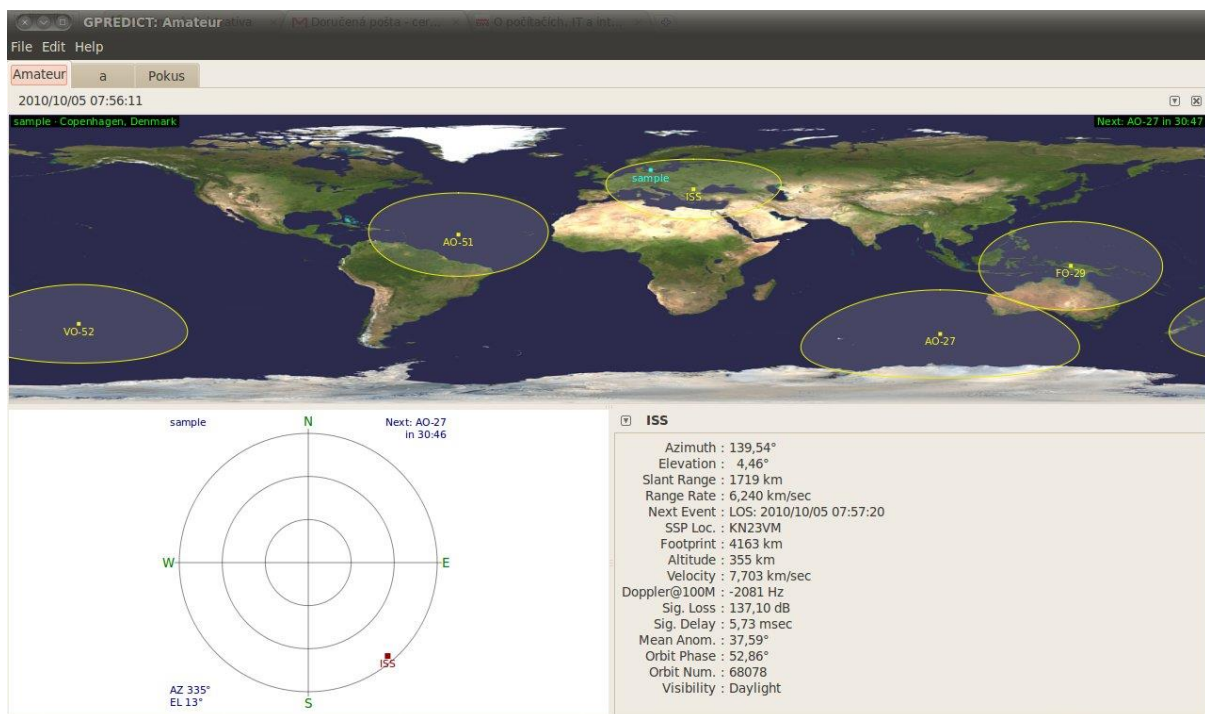
Vlivem pohybu malé družice dochází ke změnám kmitočtu (řádově v jednotkách až desítkách kHz) v obou směrech, které jsou způsobeny fyzikálním jevem nazývaným Dopplerův efekt. Proto je nutné řídit i přeladování TX a RX v závislosti na letových parametrech při pohybu malé družice. To okamžiku, kdy je signál malé družice anténou pozemní stanice zachycen nad vzestupným horizontem (AOS – acquisition of signal) do okamžiku kdy je ztracen za sestupným horizontem (LOS – loss of signal).

Vedle Dopplerova efektu působí na malé změny kmitočtu i vliv rotace (spin effect) malé družice.

Všechny výše popsané úlohy jsou řešeny v pozemní stanici pomocí speciálních sledovacích programů pro konkrétní družice a jsou k tomu účelu využívána telemetrická data přenášena z malé družice

Řada sledovacích programů je také bezplatně ke stažení na internetu (Gpredict, Orbitron, Satview, ...). Podrobnosti o jednotlivých družicích zahrnující i informace o družicích rádiové komunikace lze nalézt například na <https://www.n2yo.com/satellite/?s=42790>. Tyto informace lze je použít i pro amatérské experimentování a zachycování rádiových signálů a dekodování telemetrických dat. K tomu v praxi dostačují i ruční FM rádiové stanice v pásmech 145 MHz (VHF) a 435 MHz (UHF) a jednoduché směrové antény nebo všesměrové prutové antény.

Příkladem volně dostupného sledovacího programu je software Gpredict (<http://gpredict.oz9aec.net/>). Ten poskytuje řadu informací o sledované družici nebo jiném kosmickém objektu (např. o mezinárodní stanici ISS). Na obr. 29 je znázorněn výstup z tohoto programu na displeji počítače.



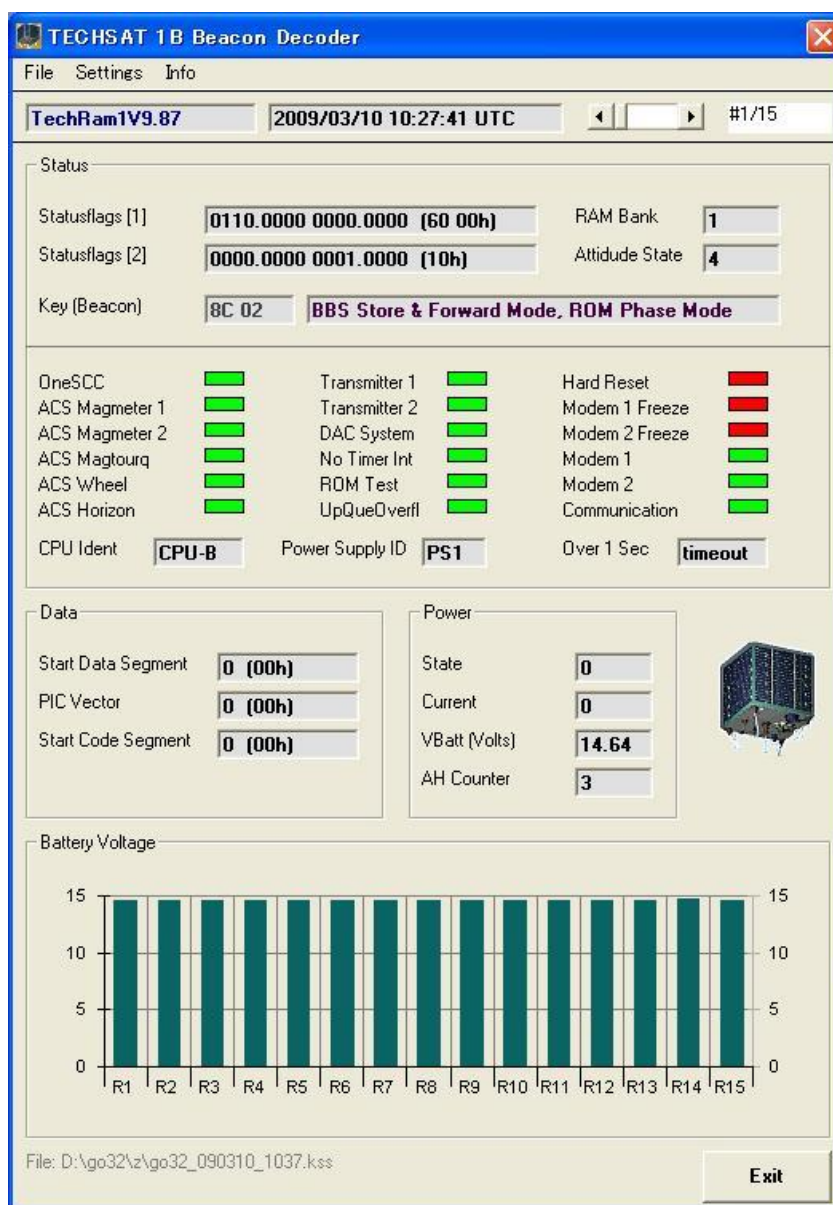
Obr. 29 Zobrazení výstupu sledovacího (tracking) programu Gpredict

Pro jednotlivé pojmenované družice jsou znázorněny jejich pokrytí signálem na zemském povrchu (footprint). Na kruhovém diagramu je červeně vyznačena poloha družice, kterou lze

přijímat v daném okamžiku v lokalitě pozemní stanice (Praha – modře). Vlevo dole jsou hodnoty azimutu, elevace, vzdálenosti a časových hodnot AOS a LOS. Vpravo dole jsou podrobné parametry vybrané družice ITUSAT 1.

Kliknutím na jméno družice se zobrazí podrobné informace o oběžné dráze, radiokomunikačním vybavení a použitých druhů modulací a nosných kmitočtech pro vzestupný směr (uplink) a sestupný směr (downlink). Výstup z programu poskytuje data pro jednotku řízení anténních rotátorů a k přeladování vysílače a přijímače pro kompenzaci Dopplerova efektu.

Jako příklad obsahu telemetrických dat může dobře posloužit výstup z dekodéru majáku malé družice TECHSAT -1 (GO-32) obr. 30.



Obr. 30 Dekódovaná palubní data z rádiového majáku malé družice TECHSAT-1

O tom, že experimentování s příjmem signálů z malých družic není třeba nějakého drahého vybavení a hlubokých odborných znalostí lze dokumentovat na obr. 31.

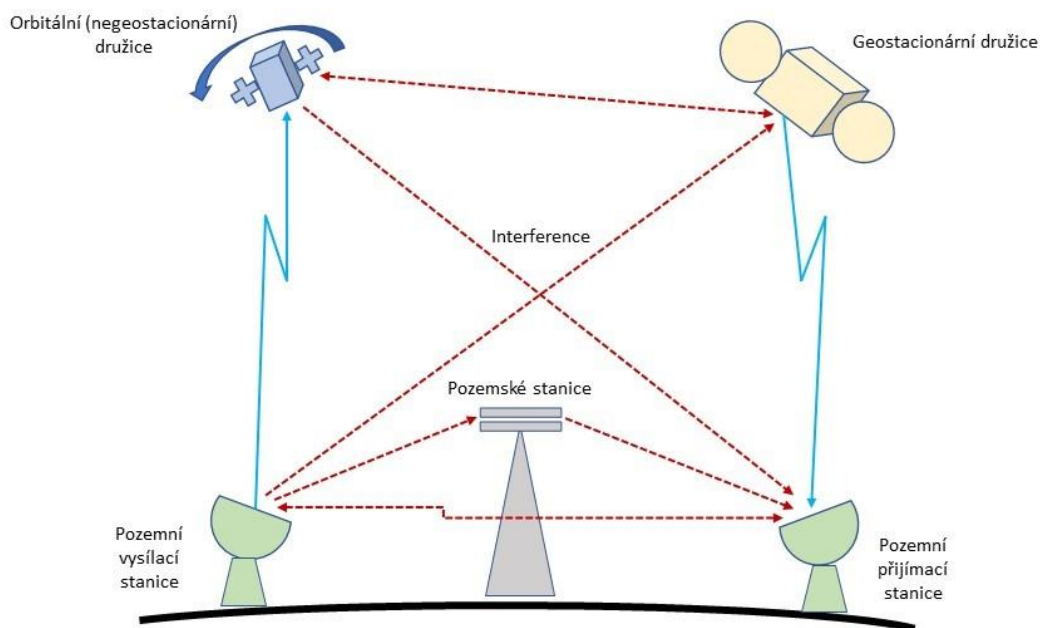


Obr. 31 Vyhledávání rádiových signálů z malých družic se díky současné technice a její finanční dostupnosti stává výukovou dětskou hrou

1.7 Rádiové spektrum

Předchozí kapitola se věnovala problematice rádiové komunikace směrem k zajištění obousměrné komunikace pro telemetrii, sledování a povely (TT&C) jak v pozemním, tak kosmickém segmentu. Zcela zásadním předpokladem pro rádiovou komunikaci jsou kmitočty vhodné pro komunikaci z hlediska podmínek šíření a ochrana před nežádoucími interferencemi. Tyto interference mohou být způsobeny rádiovými systémy kosmických a pozemských služeb v blízkém kmitočtovém pásmu nebo elektromagnetickým rušením způsobeným z dalších systémů malé družici nebo z jiných objektů.

Danou situaci možností nežádoucích interferencí ukazuje obr. 32.



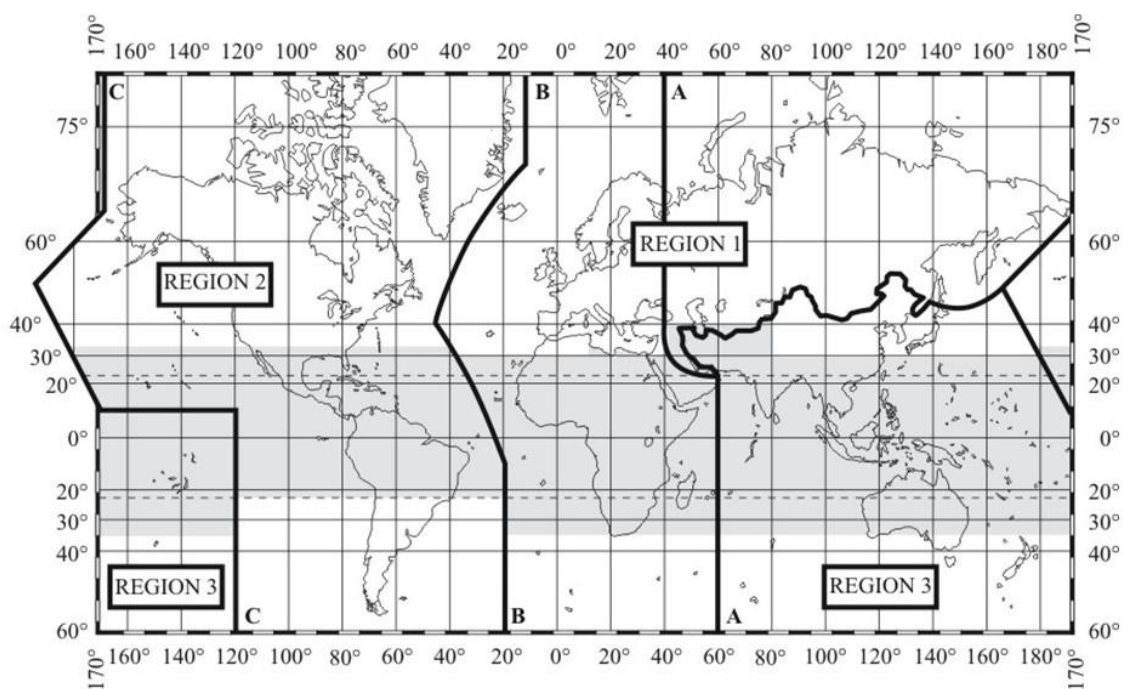
Obr. 32 Interference mezi radiostanicemi kosmických a pozemských služeb

Proto je nezbytné přijmout technicko – administrativní opatření globálního charakteru směrem ke správě rádiového spektra pro družicové služby (pevné, mobilní, navigační, rozhlasové a televizní vysílání, ...). Těmito záležitostmi se zabývá Mezinárodní telekomunikační unie – ITU (International Telecommunication Union) a její Radiokomunikační řád (RR – Radio Regulation). Ten je volně ke stažení na <https://www.itu.int/en/history/Pages/RadioRegulationsA.aspx?reg=1.41>.

Radiokomunikační řád je předmětem pravidelné tří až čtyřleté aktualizace projednávané v rámci Světových radiokomunikačních konferencí (WRC – World Radiocommunication Conference) organizované radiokomunikačním sektorem ITU-R. Administrativní záležitosti (regulace) bude z detailnějšího pohledu předmětem následující kapitoly 1.8

Radiokomunikační řád ITU (RR – Radio Regulation) ve čtyřech svazcích vymezuje v rozsahu rádiového spektra od 9 kHz do 3000 GHz kmitočtová pásma, které mohou jednotlivé radiokomunikační služby využívat spolu s dalšími technickými a regulačními opatřeními (koordinace přidělu kmitočtů a oběžných drah, doporučení, rezoluce a technické zprávy k jednotlivým radiokomunikačním službám). Tento řád je také součástí vyhlášky 105/2010 Sb., o plánu přidělení kmitočtových pásem (národní kmitočtová tabulka) k zákonu č. 127/2005 Sb., o elektronických komunikacích.

Pro tyto potřeby je svět rozdělen na tři regiony, které jsou uvedeny na obr. 33.



Obr. 33 Vymezení tří regionů v Radiokomunikačním řádu ITU-R pro potřeby správy rádiového spektra

Přidělování (alokace) úseků rádiového spektra jednotlivým službám rozlišuje tři kategorie přednostní, podružnou a skupinovou. Přednostní služba má právo na ochranu před interferencemi od ostatních služeb, podružné přidělení nesmí při svém provozu rušit služby s přednostním právem a nemá právo ochrany, skupinové podléhá dalšímu rozdělení v geografických částech světa.

Příkladem skupinového přidělení jsou kmitočtová pásma pro radioamatérskou službu, která jsou dále spravována a koordinována Mezinárodní radioamatérskou unií (IARU – International Amateur Radio Union, <http://www.iaru.org/>). Výjimky z Radiokomunikačního řádu jsou u kmitočtových přidělů uvedeny v poznámkách („footnote“ – označováno jako No. 5. xxx).

Radiokomunikační řád (Vol 1, Chapter II, Article 5) po WRC 15 umožňuje využívat pro malé družice následující kmitočtová pásma.

1.Kmitočtová pásma z přidělení pro amatérskou službu

Tato pásma jsou IARU následovně koordinována pro radioamatérskou družicovou službu takto:

Vlnová délka	Kmitočtové pásmo[MHz]	Použití
10 m	28,0 – 29,7 (přednostní)	Použití ve spojení s pásmem 144 MHz pro uplink a downlink
2 m	145,974 – 143,000 (přednostní, No. 5.282)	Tato pásma jsou v obou směrech velice využívána nejen malé radioamatérské družice, ale pro různé malé projekty v konstelacích s jednou nebo malého počtu malých družic
70 cm	435,000 – 438,000 (podružná)	
23 cm	1 260,0 – 1 270,0 (podružná, No. 5.282)	Pouze pro uplink (Země – Kosmos) v pásmu o vlnové délce 23 cm.
13 cm	2 400,0 – 2 450,0 (podružná, No 5.282)	Tato pásma slouží jako alternativa k pásmům o vlnové délce 2 m a 70 cm z důvodu jejich velké obsazenosti a problémům s interferencemi.
9 cm	3 400,0 – 3 410,0 (podružná, pouze	

	v regionu 2 a 3), No. 5.282)	Tato pásma slouží jako alternativa k pásmům o vlnové délce 2 m a 70 cm z důvodu jejich velké obsazenosti a problémům s interferencemi.
5 cm	5 650,0 – 5 670,0 (podružně, No. 5.282)	Pouze pro uplink pro experimentální radioamatérské družice.
	5 830,0 – 5 850,0 (podružně)	Pouze pro downlink pro experimentální radioamatérské družice.
3 cm	10 450,0 – 10 500,0 (podružná)	Pro radioamatérskou družicovou komunikaci (hlas, digitální a morse provoz)
1,2 cm	24 000,0 – 24 050,0 (přednostní)	

Vlnová délka	Kmitočtové pásmo [GHz]	Použití
6 mm	47,0 – 47,2 (přednostní)	Pro experimentální radioamatérské družice
4 mm	76,0 – 77,5 (podružná)	
	77,5 – 78,0 (přednostní)	
	78,0 – 81,0 (podružná)	
2 mm	134,0 – 136,0 (přednostní)	
	136,0 – 141,0 (podružná)	
1 mm	241,0 – 248,0 (podružná)	
	248,0 – 250,0 (přednostní)	

No. 5.282 Pásma 435 – 438 MHz, 1260 – 1270 MHz, 2400 – 2450 MHz, 3400 – 3410 MHz (jen v Regionu 2 a 3) a 5650 – 5670 MHz může využívat družicová amatérská služba s podmínkou, že nebude působit škodlivé rušení ostatním službám, provozovaným v souladu s

tabulkou kmitočtových přidělení (viz ustanovení RR č. 5.43). Správy, které povolují toto využívání, jsou povinny zajistit, že každé škodlivé rušení působené vysíláním stanice družicové amatérské služby bude okamžitě odstraněno v souladu s ustanovením RR č. 25.11. Využívání pásem 1260 – 1270 MHz a 5650 – 5670 MHz družicovou amatérskou službou je omezeno na vzestupný směr (uplink).

Vlnové pásmo 2 m a 70 cm je využíváno v řadě misí malých družic, které nemají charakter radioamatérské služby. Jde zejména o různé školní a univerzitní projekty využívajících malých družic kategorie CubeSat. Je to do značné míry i historicky způsobeno tím, že pro tyto projekty nebylo potřeba provádět koordinace v ITU-R a využívání těchto kmitočtů není zpoplatňováno.

Avšak pro radioamatérský provoz je na použití amatérských vysílacích radiostanic potřebná radioamatérská licence (zkouška, přidělení volací značky a udělení práva na využívání vyhrazených rádiových kmitočtů) od národního regulačního úřadu. V České republice je národním regulačním úřadem Český telekomunikační úřad (www.ctu.cz).

Druhým důvodem využívání amatérských rádiových pásem je dostupnost levných radiostanic s výkony do 100 W, které dostačují pro komunikaci s malými družicemi na LEO oběžných drahách. Dále pak široká nabídka na trhu elektronických součástí a komponent (např. SDR chipsety, levné amatérsky postavitelné YAGI antény, ...) pro stavbu malé družice a pro realizaci pozemní stanice, jak bylo pospáno v předchozí kapitole 1.6.

Tato situace do značné míry přetrvává a má negativní odraz v přetížení pásem původně určenými pro amatérskou službu. Důsledkem této skutečnosti je nárůst rizika, že nespolehlivá rádiová komunikace s malou družicí může zapříčinit předčasné ukončení mise nebo nehody na oběžné dráze. To vše se může následně negativně promítnout do finančních ztrát takového projektu a popřípadě hrazení škod způsobené takovou malou družicí.

2. Kmitočtová pásma přidělená stanicím pevné a pohyblivé služby umístěné na družicích, které se pohybují na oběžných drahách (NGSO - negeostacionární družice) kosmickým službám vyžadující koordinaci podle Radiokomunikačního řádu.

Použití těchto pásem vyžaduje u ITU-R podle ustanovení Radiokomunikačního řádu (sekce II čl. 9 RR) požádat o koordinaci a notifikaci přidělení kmitočtů a pozici na oběžné dráze. To je proces značně zdlouhavý, který může trvat i několik roků, následná platnost notifikace je omezena na 3 roky a také je zatížen poplatky, které je nutné za využívání kmitočtů u ITU platit. To je velice omezující faktor pro většinu misí malých družic a zejména pro školní a univerzitní projekty. Navíc s rozvojem využívání a současného vypouštění většího počtu malých družic, jako součást konstelací různých sítí s životností do tří let, vyžaduje nalézt další vhodné kmitočty a regulační mechanismy jejich využívání.

Proto na WRC 15 byla přijata rezoluce č. 659, která uložila studovat požadavky na rádiové spektrum pro telemetrii, sledování a povely (TT&C – Telemetry, Tracking and Command) ve službě kosmického provozu pro negeostacionární družice (NGSO) s krátkou dobou trvání misí, vyhodnotit vhodnost stávajících přidělení pro službu kosmického provozu, a pokud bude zapotřebí posoudit nová přidělení pro malé družice kategorie nano a piko.

Výsledky studií, které budou projednávány na nadcházející WRC 19 v agendě AI 1.7 ukazují, že stávající přidělení v pásmech pro kosmické služby pod 1 GHz, které vyžadují provádět koordinaci a notifikaci podle RR 9.21 nejsou pro nano a piko družice vhodné. Je navrhováno přidělení kmitočtového pásma 150,05 – 174,0 MHz a 400,15 – 420,0 MHz. Přičemž nemůže být využito pásmo 406,0 – 406,1, které je vyhrazeno pro záchranné rádiové bóje (letecké a námořní EPIRB, osobní PLC, ...).

Na přípravné konferenci CPM 19 byly ve zprávě pro jednání WRC 19 navrženy tyto způsoby řešení (metody) [<https://www.itu.int/pub/R-ACT-CPM-2019>]:

Metoda A: žádná změna v RR.

Metoda B1: přidělení 1 MHz nepodléhající koordinaci podle sekce II čl. 9 RR službě kosmického provozu pro vzestupný směr (uplink) pro systémy nano a piko družice s krátkou dobou trvání (NGSO SD) v pásmu 403–404 MHz.

Metoda B2: přidělení 1 MHz nepodléhající koordinaci podle sekce II čl. 9 RR pro vzestupný směr v pásmu 404–405 MHz.

Metoda C: využít stávající přidělení služby kosmického provozu v pásmu 137–138 MHz pro sestupný směr (downlink) a 148–149,9 MHz pro vzestupný směr a vypracovat příslušná regulatorní ustanovení v RŘ pro TT&C spoje NGSO SD misí.

Součástí všech metod je návrh na zrušení Rezoluce 659 (WRC-15).

Lze tedy očekávat, že případné přidělení určitých úseků z výše uvedených pásem bude doprovázeno řadou dalších podmínek a omezení. Zejména jde o otázky týkající se plánů velkých (mega) konstelací ve vztahu ke kompatibilitě stávajících kosmických služeb.

Je také zřejmé, že rádiové spektrum má svoje limity. S dalším nárůstem velkých konstelací malých družic bude potřebné hledat i jiné způsoby řešení bezpečné a spolehlivé komunikace.

Jako perspektivní a nadějně se ukazuje využití optických spojů (nosné médium laserový paprsek) jak pro komunikaci mezi pozemní stanicí a malými družicemi (pozemní segment), tak mezi sebou v kosmu (kosmický segment).

Příkladem ověřování možností využití optické komunikace u malých družic mohou být nadějně experimenty s malými družicemi CubeSat realizované v rámci programu NASA Small Spacecraft Technology (SST) (https://www.nasa.gov/directorates/spacetech/small_spacecraft/index.html).

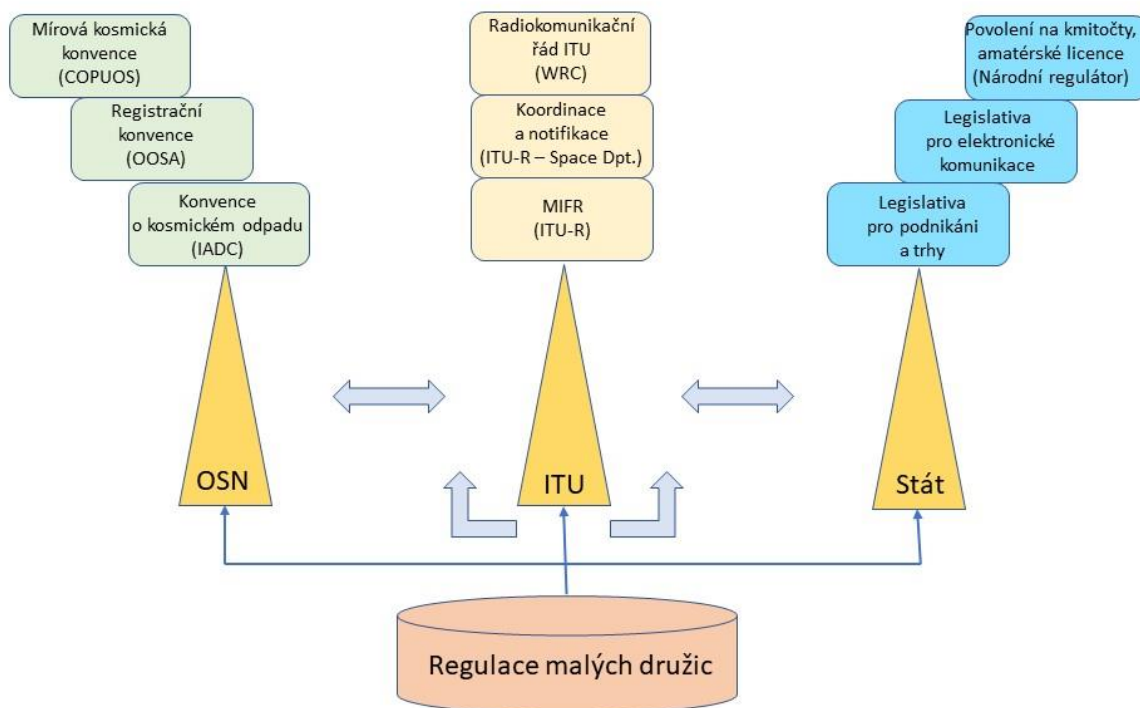
V tomto směru probíhá řada nadějných experimentů, ve kterých je aktivní NASA [https://www.nasa.gov/directorates/spacetech/feature/cubesat_laser_communications_capability].

Je nepochybné, že optická komunikace bude hrát důležitou roli v rozvoji využívání malých družic a zejména pak u velkých konstelací.

1.8 Regulace malých družic – administrativní a legislativní požadavky spojené s provozem malých družic a jejich sítí

Z faktu, že malá družice je umělé kosmické těleso, které je nutné vynést do kosmu, komunikovat s ním pro účely řízení jejího pohybu po dobu životnosti a zajištění jejího zániku, že je zde nutnost řešení ochrany a případných škod způsobených jiným umělým kosmickým objektům, vyplývá i nezbytnost aplikace jistých regulačních opatření.

Tato opatření pro malé družice představují jejich regulaci a mají specifický technický, administrativní a legislativní charakter vyplývají z obecné regulace pro umělé objekty vysílané ze Země do kosmu. Tuto regulaci si můžeme rozčlenit do tří základních oblastí (pilířů), na kterých je kosmická regulace postavena jak je znázorněno na obr. 34.



Obr. 34 Oblasti a vzájemné vazby tvořící regulaci malých družic

Cílem regulace nepochybně by mělo být vytvoření a naplňování takových opatření, které zaručí všem zájemcům rovnoprávný přístup a ochranu k jejich aktivitám v kosmu při využívání technologií malých družic, umožnit vytvoření jejich férového a svobodného soutěžního segmentu na kosmickém trhu pro oblasti vývoje, výroby a služeb a umožnit edukativní aktivity

škol, universit a dalších zájmových skupin. To jak z pohledu globální, tak regionální a národní regulace.

V souvislosti s regulací malých družic ve smyslu výše uvedeného si lze v prvním přiblížení položit několik otázek. Je třeba vůbec nějaká regulace, a když, tak jaká? Když už ano, tak může dostačovat to, co již existuje?

V současné době z pohledu regulace uplatňované v kosmu jsou k dispozici tyto nástroje:

- Mezinárodní smlouvy vztahující se k využívání a ochraně kosmu (OSN – UN COPUOS, United Nations Committee on the Peaceful Uses of Outer Space), – konvence o mírovém využívání kosmu, konvence o oznámení a registrace v mezinárodním registru OSN u UNOOSA, konvence o odpovědnosti za škody a omezování kosmického odpadu.
- Ustanovení Radiokomunikačního řádu ITU pro kosmické služby a zápis do registru MIFR (Master Information Frequency Register).
- Předpisy Mezinárodní radioamatérské unie (IARU) – kmitočtová a orbitální koordinace v pásmech amatérské služby.
- Národní regulace (zákony a předpisy pro elektronické komunikace, provoz, výroba, vypouštění umělých těles do kosmu) – udělování licencí k amatérskému vysílání, podmínky pro komerční a nekomerční využití rádiového spektra a podnikatelských činností na telekomunikačním trhu.

Historicky zásadním krokem pro rozvoj kosmických rádiových komunikací byla mimořádná administrativní konference pro přidělení kmitočtových pásem pro kosmickou radiokomunikační službu v Ženevě v roce 1963. V roce 1967 vznikla na půdě OSN smlouva o mírovém využívání kosmu (Outer Space Treaty) a pro kontrolu jejího plnění byl založen Výbor OSN pro mírové využívání kosmického prostoru UNCOPUOS (zkráceně COPUOS) a její orgán pro registraci UNOOSA (zkráceně OOSA).

Zcela zásadní oblastí spojenou ve využívání kosmu je ochrana všech umělých objektů a zabránění vzniku nežádoucího kosmického odpadu.

V oblasti právní ochrany umělých objektů (tedy i malých družic) byla v rámci COPUOS přijata konvence odpovědnosti za škody způsobené umělým objektem [10].

Jako zásadní lze považovat tato ustanovení:

- Do odpovědnosti, ve smyslu ustanovení konvence, se zahrnuje i pokus o vypuštění a jeho selhání. (Article I).
- Stát, který vypouští, je naprosto odpovědný za náhradu škody způsobené jeho kosmickým umělým objektem na povrchu Země nebo letadlem za letu. (Article II).

- V případě škody způsobené jinde než na povrchu Země kosmickému umělému objektu jednoho vypouštěcího státu nebo osobám nebo majetku na palubě takového umělého objektu umělým objektem vypuštěným jiným státem, tento umělý objekt nese odpovědnost pouze, pokud škoda je způsobena jeho zaviněním nebo zaviněním osob, za které je odpovědný (Article III). To v praxi má za důsledek, že odpovědnost za škody se týkájí všech, kteří se na vypuštění malé družice podílejí (státní a vědecké instituce, výrobci, provozovatelé, sponzoři, apod.).
- Registrace umělých objektů je prováděna v OOSA a je uplatňována vůči těm státům, které tuto konvenci ratifikovali (Česká republika ano). Ten plní tyto funkce:
 - navazuje komunikaci mezi státem, který vypouští umělý objekt a OSN,
 - činí opatření pro národní registraci vypouštěných umělých objektů,
 - vytváří a udržuje registr všech vypuštěných a zaniklých umělých objektů,
 - poskytuje informace státům o vypuštěných a zaniklých objektech,
 - poskytuje data potřebná pro zavádění a plnění dalších mezinárodních závazků vztahujících se ke kosmu.

Registrace se provádí prostřednictvím diplomatických misí u OSN. V případě České republiky má tuto odpovědnost Ministerstvo zahraničních věcí.

V současné době je v COPUOS a OOSA řešeno, jak se vypořádat s registrem v případě malých družic a jejich konstelací. Obrovské množství vypouštěných malých družic a jejich krátká doba mise je obvykle kratší, než vlastní zpracování registrace u OOSA. K tomu dále přistupuje, že řada států včetně České republiky nemá ani příslušnou legislativu, která by zavazovala subjekty tyto mise malých družic oznamovat na národní úrovni v případě, že nejsou notifikovány u ITU.

O regulaci z pohledu správy rádiového spektra bylo podrobněji pojednáno v předchozí kapitole, ale bude užitečné si zde ukázat i na další souvislosti s regulativními opatřeními na úrovni OSN.

Na základě této smlouvy o mírovém využívání kosmu je v základním dokumentu ITU - Ústavě ITU v článku 44 deklarováno, že rádiové kmitočty a orbitální dráhy jsou omezeným přírodním zdrojem, který je nutné racionálně, efektivně a ekonomicky využívat a pro všechny zájemce musí být zajištěn rovný přístup. Cílem článku 44 a následných ustanovení v Radiokomunikačním řádu ITU je zabezpečení ochrany proti škodlivému rušení, stanovení celosvětových standardů pro zajištění interoperability a kvality, rovného přístupu a ekonomického využívání rádiového spektra a oběžných drah v kosmu. Jaký bude další vývoj regulace malých družic naznačí rovněž závěry a případné úpravy v radiokomunikačním řádu z nadcházející konference WRC 19.

Tady je potřeba se zmínit, že zvláště na školní a akademické půdě je dnes tato problematika naplňování regulačních opatření často stále opomíjena. Většina úsilí týmů je věnována vývoji

vědeckého a výzkumného vybavení nebo konstrukci vlastní družice. Otázky zajištění provozu malé družice a naplnění příslušné mezinárodní a národní legislativy zůstávají hodně v pozadí, pokud jsou vůbec v projektech a v úvodu jejich realizace brány v potaz nebo se o nich ví. To je také dost častá příčina neúspěchu řady takových projektů, protože se s náklady na administrativní procesy a jejich možné finanční dopady nepočítalo. Důsledkem pak často je, že dochází k nemožnosti splnit termíny mise s ohledem na opožděný start nosné rakety nebo dokonce jsou zvolena kmitočtová pásma mimo přiděly v Radiokomunikačním řádu. Rovněž povinnost registrace u OOSA a výše uvedených mezinárodních závazků také nebývá splněna.

Dalším fenoménem, který bude třeba urychleně řešit, je otázka efektivního

a spolehlivého řízení malých družic a konstelací jejich sítí. Už dnes je zřejmé, že budování a provozování pozemních stanic bude vyžadovat širší spolupráci více subjektů. Což se například ukázalo i při realizaci projektů v rámci malých družic QB 50. Jinak by totiž nemuselo platit, že náklady na síť malých družic jsou ve výsledku malé.

Třetím pilířem regulace nejen malých družic je ochrana před vznikem kosmického odpadu a jeho odstraňování. V rámci COPUOS je ustavena pracovní skupina pro dlouhodobou udržitelnost kosmických aktivit (Working Group on the Long Term Sustainability of Space Activities).

Pracovní skupina se zabývá tematickými oblastmi včetně udržitelného využívání kosmu podporujícího rozvoj na Zemi (kosmický odpad, kosmické operace a nástroje na podporu spolupráce, kosmické počasí, regulační režimy a pokyny pro aktéry v kosmickém prostoru). [11].

Nad problematikou ochrany před kosmickým odpadem a hledání způsobů, jak ho odstraňovat se angažuje celá řada dalších vlád. Aktivní je kromě USA například Francie, která má zákon o kosmickém provozu (French Space Operation Act) a vládní a nevládní instituce. Významnou z nich je vládní organizace IADC (Inter-Agency Space Debris Coordination Committee). Jejími členy jsou vlády a kosmické agentury (např. NASA, Evropská kosmická agentura ESA, ...), které mají aktivity v kosmu. IADC je platformou pro výměnu informací a spolupráci na výzkumech, vývoji metod a prostředků pro potlačování kosmického odpadu.

Výstupem její činnosti jsou metodiky, studijní zprávy a doporučení (Guidelines). Ty zahrnují doporučení k potlačení vzniku kosmického odpadu a aktivní a pasivní způsoby jeho odstraňování a prevenci před vznikem nehod. To s důrazem na efektivitu nákladů, které by se měly brát v úvahu při plánování a navrhování kosmických lodí, družic a nosných raket s cílem minimalizovat nebo eliminovat vytváření trosk během jejich provozu a odstranění po ukončení provozu. Časový interval 25 let je považován za dostatečně vhodný uplatňování dohodnutých doporučení a následně je aktualizovat. Tento dokument obsahuje pokyny pro

snížení jakéhokoliv druhu odpadu (nefunkční družice nebo jejich úlomky, atd.). tato doporučení jsou přijímána na základě konsensu v této pracovní skupině.

Pro kosmický odpad platí závislost nazývaná jako Kesslerův syndrom (Donalda J. Kessler - expert NASA pro otázky kosmického odpadu) [<http://www.spacesafetymagazine.com/space-debris/kessler-syndrome/>].

Kesslerův syndrom lze interpretovat tak, že při každé srážce na nízké oběžné dráze vznikne oblak trosek, jež dále zvětšují pravděpodobnost kolize s jinými objekty.

V současné době existuje řada projektů, které využívají malých družic k odstraňování kosmického odpadu na LEO drahách. K tomuto účelu se používá například cílené zachytávání odpadu různými způsoby (zachytávání do sítí, sběr pomocí robotické ruky, harpunování, ...) do sběrných košů a následně nasměrování (vysypání) do nízkých vrstev atmosféry (pod 300 km), kde beze zbytku shoří.

<https://www.youtube.com/watch?v=7CEH9V9psKY>

Video 2. Videoanimace mise pro odstraňování kosmického odpadu vzniklého provozem malých družic

Je zřejmé, že kosmický odpad s nárůstem počtu malých družic a zejména jejich velkých konstelací v kosmu je a bude v budoucnu vážným problémem, který bude v budoucnu nutné účinně řešit. To nejen z technického hlediska, kdy může způsobit různé nehody v kosmu nárůst kosmického odpadu, ale i z možných právních důsledků plynoucích z řešení škod. Z tohoto důvodu je v rámci plánování Každé mise nezbytné řešit i způsob jejího zániku.

1.9 Ekonomické otázky spojené s vývojem a využíváním malých družic

V této kapitole se budeme věnovat oblasti spojené s plánováním a financováním vlastní mise. Dále pak otázkám spojeným s ekonomickými aspekty a přínosy s ohledem na kosmický trh a dopadů do oblasti rozvoje ekonomické úrovně hospodářství státu a společnosti.

Finanční zdroje pro pokrytí rozpočtu projektů misí malých družic jsou z zcela zásadním aspektem ovlivňujícím naplnění jejich cílů.

Proto je důležité vždy věnovat odpovídající pozornost vypracování finanční strategie současně při tvorbě plánu mise. Jednotlivé položky plánu musí být vždy spojeny se zdroji financí jak v čase, tak v potřebné výši. V porovnání s misemi velkých družic jsou náklady u malých družic podstatně nižší, ale jedná se o finanční částky řádově od stovky tisíc euro.

Zcela výjimečně je k dispozici pouze jediný finanční zdroj – investor pro pokrytí rozpočtu mise. Proto musí strategie financování každé mise obsahovat více variant, včetně záložních variant pro případ, že v daném čase nebude požadované finanční krytí nebo zdroj financí – investor přestane plnit svoje závazky.

Úloha vypracování dobré finanční strategie je značně komplikovanou záležitostí vzhledem k počtu vstupů a jejich časovou návazností doprovázené řadou nejistot díky tomu, že daná mise obsahuje vždy vnější spolupráci. Jsou zde časové návaznosti na subjekty poskytující vystřelení malé družice a její umístění na oběžnou dráhu a následně její zánik, administrativní záležitosti spojené se získáním práva na využívání kmitočtů a případné pronájmy provozních časů na pozemních stanicích. Finanční strategie musí také obsahovat odhady rizik.

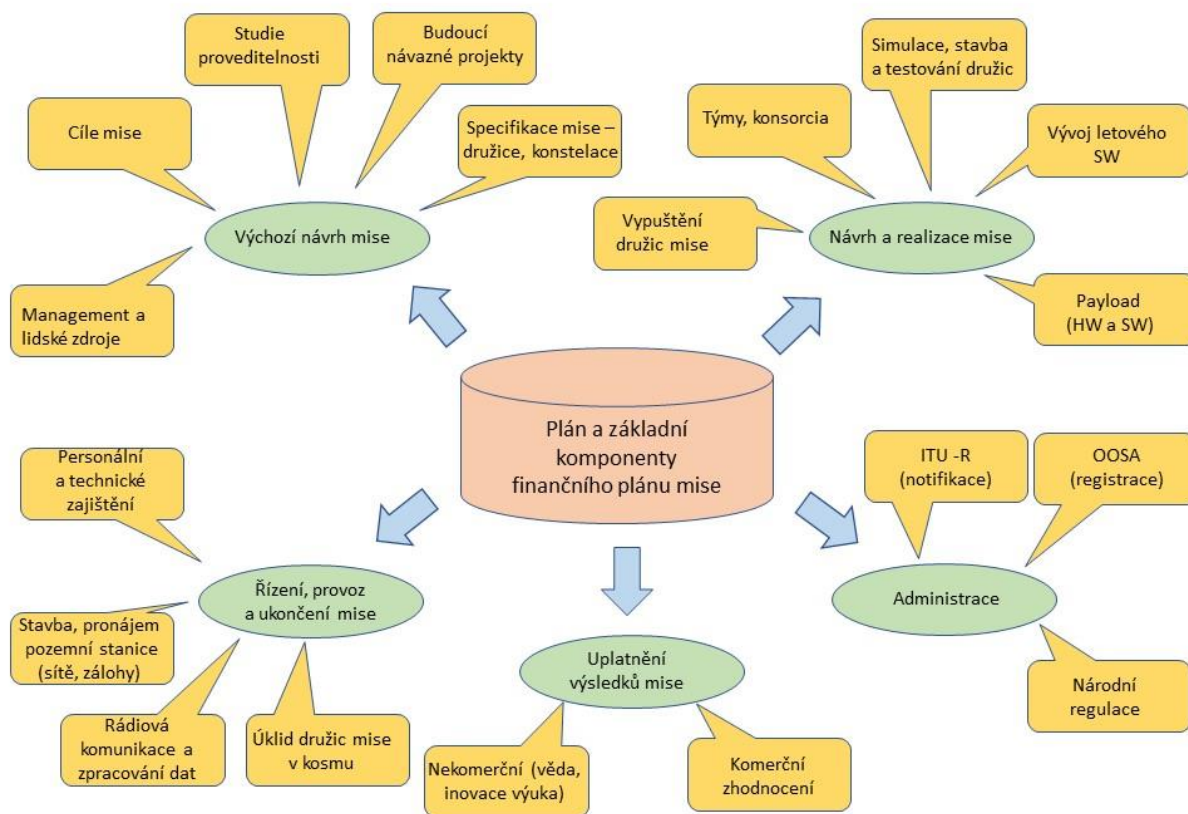
Je zřejmé, že podcenění nebo chybně vypracovaný rozpočet a strategie jeho financování může vést k neúspěchu celé mise nebo její části. To dokazuje v praxi řada neúspěšných misí nejen ve školních a univerzitních projektech. Mnoho projektů má také díky tomu značné zpoždění.

Příkladem z naší republiky může být projekt občanského sdružení czCube (<http://www.czcube.org>), který si kladl za cíl zkonstruovat a postavit malou amatérskou nanodružici a nanosondu (sluneční plachetnice) s modulovou koncepcí dostupnou i pro amatéry (finančně, organizačně i technologicky). Projekt byl zahájen v roce 2004 nebyl po 10 letech realizován a tak byl v roce 2014 ukončen. V provozu po něm zůstává automatizovaná pozemní stanice czCube.

V zahraničí skončily částečným neúspěchem a bankrotem projekty telekomunikačních malých družic jako Orbcomm, Iridium, Global star nebo Teledesic na LEO a MEO oběžných drahách. Svoje plány musel upravit projekt OneWeb. O řadě školních a univerzitních projektů jsou

známy jen informace o plánech na jejich internetových stránkách. Na neúspěšnosti některých misí se v letech 2007 – 2010 podílela celosvětová finanční krize.

Jak již bylo uvedeno, tak úspěšnost mise je nepochybně spjata s dobře vypracovaným plánem jak vlastní mise, tak jejím finančním zajištěním. Vypracování strategického plánu mise a k němu finančního plánu je zcela zásadním momentem pro uskutečnění každé mise malých družic. Pro představu co takový plán všechno v obecném základu zahrnuje může posloužit obr. 35.



Obr. 35 Struktura a komponenty plánu mise malých družic

Je zřejmé, že ani v nejlepším plánu nelze postihnout všechny parametry a vždy existuje řada neznámých. Ve strategickém plánu má každá komponenta plánu mise určitou finanční váhu, neboli koeficient, kterým jsou tyto komponenty oceňovány. Rovněž v něm je třeba stanovit soubor krizových parametrů a postupy jejich řešení zahrnují i okolnosti, které by měli indikovat i zastavení pokračování realizace mise nebo přehodnocení jejích cílů. Je zřejmé, že jiné koeficienty budou aplikovány u malých misí malých družic a jiné u jejich konstelací s velkými počty družic. To včetně toho, zda jde o komerční, vědecko-výzkumné cíle nebo pro výuku.

Jak již bylo výše uvedeno, tak v průběhu realizace plánu může docházet k neočekávaným okolnostem jak z pohledu splnitelnosti cílů mise, tak způsobu zajištění potřebných zdrojů financování. Přesto všechno je naprosto zásadní v době formulování plánu mise zahrnout do něho všechny známé komponenty spolu s odhady možných rizik. Pro každou komponentu z obr. 33 by měl vždy existovat finanční plán pro její zajištění, zahrnující i rizika a varianty.

Pro vypracování finanční strategie – odhadů potřebných finančních částek pro mise malých družic zejména v oblasti vlastní realizace družic, vypuštění a provozu jsou používány různé finanční modely.

V počátcích rozvoje malých družic byly používány modely pro mise velkých družic na MEO, HEO nebo GEO oběžných dráhách. Postupem času se ukázalo, že tyto modely nelze jednoduše převzít a aplikovat. Proto pro mise malých družic postupně vznikly speciální modely.

Jedním z nich je například model společnosti Aerospace DS [13], který je využitelný i pro malé školní a univerzitní projekty. Tento model byl od svého vzniku v roce 2000 do roku 2014 postupně upravován a doplňován a existuje pro hmotnostní kategorii od 100 kg do 1000 kg a pro malé družice o hmotnosti pod 100 kg.

Tento model zahrnuje vymezení komponent, odhady odvozené z technických a cenových dat předchozích misí (CER – Cost Estimating Relationship) pro účely, konfigurace, technologie a programování, modely pro odhad rizik, finančních podpor a jeho implementaci.

V model jsou oceňovány následující komponenty a jejich subsystémy mise:

pro řízení mise (PM) a systémové inženýrství (SE) a zajištění mise (MA). Pro letový (kosmický segment) to jsou parametry oběžné dráhy a řídicí subsytém jejího udržování (ADCS), systém stabilizace, napájení, telemetrie a povelování (TT&C), povely a zpracování dat zahrnující letový software, strukturu (C&DH) a tepelný systém. Pro payload pak integraci, montáž a testování (IA&T) včetně pozemních podpůrných přístrojů), program pro řízení systémů (PM) a jejich technickou podporu (SE), zajištění mise (MA), umístění a provoz na oběžné dráze (LOOS). Dále pak pozemní segment, provozní plnění cílů mise a vypouštění ze Země.

Model se snaží odhadnout finanční náklady pro jednotlivé výše uvedené subsystémy a komponenty, jejichž konkrétní příklady jsou uvedené v následující tabulce.

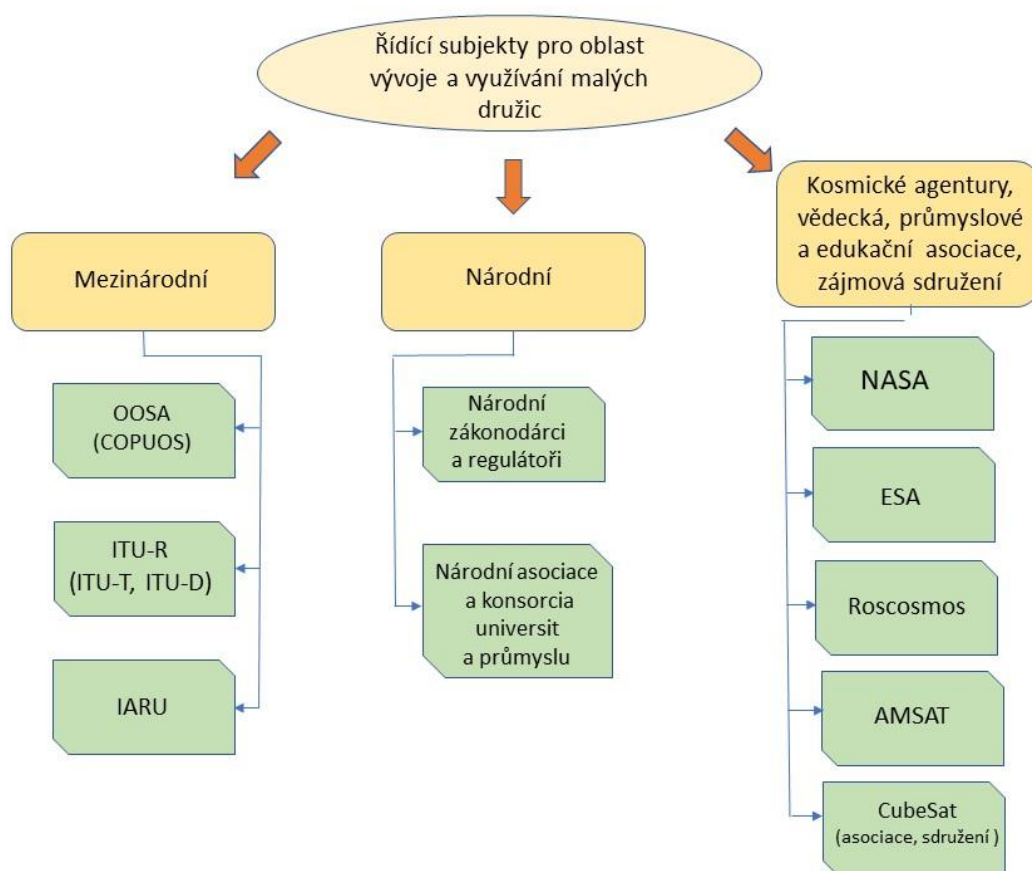
Subsystém	Komponenty
ADCS	řídící elektronika, polohové senzory (Zem, Slunce, hvězdy, magnetometr, gyroskop), pohony (momentové cívky, reakční / hybná kola) a gravitační ramena
Pohonný systém	nádrže, servo-elektronika a provedení pohonu
Napájecí zdroje	napájecí baterie, elektronika řízení výkonu, měniče výkonu, svazky vodičů a fotovoltaické panely
TT&C/C&DH	antény, odpovídače, jednotky v základním kmitočtovém pásmu, přijímače, vysílače, telemetrické kodéry / dekodéry, příkazové procesory, výkonové zesilovače, zařízení pro zpracování signálů a dat a magnetické nebo polovodičové zapisovače dat
Konstrukce družice	podpůrné konstrukce pro kosmické lodě a payload, spouštěcí adaptér nebo mechanismus umístění na oběžné dráze, další mechanismy a různé menší části
Tepelný systém	termostaty, ohřívače, izolace (pásky, deky), speciální vodiče a tepelné trubky. Nezahrnuje chladičí zařízení specifické pro payload.
IA&T	Specifikace výzkumu / požadavků, návrh a rozvrh postupů IA&T, vybavení pozemní podpory, sběrnice kosmických lodí a integrace zátěže na sběrnici, testování systémů a vyhodnocení a analýzy dat z testů. Typické zkoušky zahrnují tepelné vakuum a cyklus, elektrické a mechanické funkční, akustické, vibrační, elektromagnetickou kompatibilitu / rušení a výbušný šok (pyroshock) při startu rakety.
PM/SE/MA	Systémové inženýrství (zabezpečování kvality, spolehlivosti, požadavky na činnost), řízení programu, data / vytváření přehledů a speciální studie, které se nevztahují ke konkrétním družicovým subsystémům
LOOS	Plánování předběžného vypuštění, analýza trajektorie, podpora startovacích systémů, integrace vypouštěcích dopravních prvků pro umístění na oběžné dráze (část kosmických lodí) a počáteční operace na oběžné dráze před předáním malé družice provozovateli (vlastníkovi družice), což trvá obvykle 30 dní.

O některých dalších aspektech majících vliv na výši rozpočtových nákladů misí malých družic spojenou z hledáním úspor zvláště u malých školních a univerzitních projektů bude pojednáno později u příkladů konkrétních projektů malých družic standardu CubeSat.

1.10 Mezinárodní a národní řídicí a regulační subjekty pro oblast a využívání malých družic

Jak již bylo v předchozích kapitolách zmíněno, tak na řízení, koordinaci a regulaci vývoje a využívání malých družic se podílí řada mezinárodních organizací vládního nebo nevládního sektoru. O řadě z nich bylo pojednáno na různých místech v předchozích kapitolách. Přesto bude vhodné v této kapitole uvést souhrnný přehled.

Pro tyto účely bude vhodné si dané téma rozdělit na oblasti tak, jak je ukázáno na obr. 36



Obr. 36 Oblasti působení organizací podílejících se na řízení a regulaci vývoje a využívání malých družic

Jedním z hlavních důvodů existence daných subjektů vychází ze základního aspektu, že kosmos „patří všem“ a je třeba zajistit jeho mírové využívání a ochranu kosmu. To ve vztahu ke všem umělým objektům vysílaným do kosmu a tedy i pro malé družice a jejich konstelace.

Proto již od počátku aktivit v kosmu byla věnována značná pozornost vzniku mezinárodně platných nástrojům způsobů, jak toto zajistit.

Na úrovni Generálního shromáždění Organizace spojených národů vznikla konvence o mírovém využívání kosmu. Pro kontrolu jejího plnění byl zřízen stálý výbor pro mírové využívání kosmu UNCOPUOS (The Committee on the Peaceful Use of Outer Space). Jejím sekretariátem je UNOOSA (zkráceně OOSA, úřad pro kosmické záležitosti), který vykonává funkce spojené s registracemi umělých kosmických objektů. Sídlo je ve Vídni.

OOSA má dva základní orgány: právní podvýbor a vědeckotechnický podvýbor. Právní podvýbor řeší otázky spojené s mezinárodní spoluprací v oblasti kosmického práva a dohled nad jeho uplatňováním. Dále se zabývá spoluprací s mezinárodními organizacemi působícími na poli kosmického práva (např. ESA, UNESCO, UNIDROT). Zabývá se i problematikou definic kosmického prostoru, zásadami využívání zdrojů jaderné energie v kosmickém prostoru. Druhým orgánem je Vědeckotechnický podvýbor. Jeho úlohou je mezinárodní vědeckotechnická spolupráce v oblasti kosmických aplikací, koordinací kosmických aktivit v rámci systému OSN, spoluprací s dalšími mezinárodními organizacemi působícími na poli kosmického výzkumu a aplikací (např. ESA, UNESCO, WMO, COSPAR...) a problematikou prevence a monitorování přírodních katastrof. Vykonává rovněž funkci sekretariátu mezinárodního výboru pro globální družicové navigační systémy (ICG - International Committee on Global Navigation Satellite Systems).

Významnou aktivitou Úřadu pro kosmické záležitosti, Výboru OSN pro mírové využívání kosmického prostoru a jeho podvýborů je také podpora rozvojové spolupráce zaměřená na vodní zdroje, monitorování pobřežních vod, rybolov, geologické studie, zemědělství, lesnictví, územní plánování, oceánografii, zeměměřičství a prevenci a monitorování přírodních katastrof.

Rádiová komunikace v pozemním a kosmickém segmentu se neobejde bez přidělování rádiových kmitočtů a ochrany komunikace před nežádoucími rušivými interferencemi. To je úlohou Mezinárodní telekomunikační unie – ITU a jeho radiokomunikačního sektoru ITU-R ve spolupráci se standardizačním sektorem ITU-T a sektorem rozvoje ITU-D. Regulace probíhá prostřednictvím Radiokomunikačního řádu (Radio Regulation), doporučení (standardů) a zpráv vydávaných v jednotlivých sektorech ITU. Ty jsou ve vztahu k družicovým komunikacím výsledkem prací studijních skupin ITU-R: SG 1 správa rádiového spektra (Spectrum management), SG 4 kosmické služby (Space Services) a SG 4 Vědecké služby (Science services). V řadě případů se studijní otázky řeší ve společných pracovních skupinách ze sektorů ITU-T a ITU-D.

V případě amatérské služby jsou otázky rádiového spektra řešeny v rámci koordinací v Mezinárodní radioamatérské unie – IARU.

Samozřejmě na rozvoj a využívání malých družic má svůj významný podíl úroveň národní regulace. To znamená, jaká opatření technického (správy rádiového spektra) a právního

charakteru (zákony vztahující se k využívání rádiového spektra, poskytování radiokomunikačních služeb, kosmické průmyslu a k využívání rádiového spektra.

Většina států má svoje zákonodárné a regulační a orgány a subjekty, které mají na starosti rozvoj kosmického průmyslu, vědy, výzkumu a vzdělávání pro potřeby jak veřejných služeb, tak vojenských a ochrany státu. Řada z nich má vypracovány strategické plány ve využívání kosmu.

V České republice byl vládou schválen Národní kosmický plán na roky 2014 a 2019 (http://www.czechspaceportal.cz/files/files/NKP_2014/Graphic_ver/NKP_2014_2019_CZ.pdf). Tento plán bude vládou aktualizován i pro následující období 2020 – 2025.

V oblasti tvorby legislativy působí Ministerstvo průmyslu a obchodu – odbor elektronických komunikací, Ministerstvo dopravy a jeho Koordinační rada ministra dopravy pro kosmické aktivity (<http://www.czechspaceportal.cz/>) a Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy. Poslední dvě ministerstva jsou pak odpovědné za naše aktivity v Evropské kosmické agentuře ESA.

Česká republika se v ESA podílí jak na povinných vědeckých programech, tak na dalších programech ESA a přispívá finančně do jejího rozpočtu (členský příspěvek, spolufinancování programů a projektů našich subjektů v nich). Včetně těch, které zahrnují využívání malých družic. Poradním a konzultačním orgánem je Česká kosmická kancelář (www.czechspace.cz).

Regulačním orgánem v oblasti rádiového spektra je Český telekomunikační úřad – ČTÚ (www.ctu.cz). Jako poradní a konzultační orgán působí Česká kosmická kancelář (www.czechspace.cz).

Mezi nejvýznamnější subjekty z hlediska tvorby a řízení kosmických aktivit zahrnující i malé družice se řadí zejména americká NASA (National Aerospace and Space Administration - <https://www.nasa.gov/>) a Evropská kosmická agentura ESA (European Space Agency - <https://www.esa.int/ESA>) spolu se ruskou Roscosmos (<http://en.roscomos.ru/>).

Směrem k malým družicím to jsou jejich různé vědecko-výzkumné, průmyslové a edukační programy, celosvětové spolupráce dalších států a univerzitních sdružení pro využívání Mezinárodní kosmické stanice ISS jako platformy pro jejich vypouštění malých družic (nejen kategorie CubeSat) a konstelací na LEO oběžné dráhy a mnoho a mnoho dalších projektů misí. K tomu je třeba připočítat i programy využívající privátních společností pro vypouštění a umístování malých družic na LEO oběžných dráhách a jejich jako je například Space X.

Velké využití mají zvláště v edukačních projektech škol, universit a zájmových sdružení radioamatérů družice OSCAR, které jsou aktivitou mezinárodní organizace AMSAT (Radio

Amateur Satellite Corporation - <https://www.amsat.org/>) a jednotlivých regionálních uskupení AMSAT. Ty jsou dobrým odrazovým můstkem pro každého zájemce pro teoretické i praktické seznámení s problematikou malých družic. Je opravdu možné s malými družicemi i ve výuce začít s minimálními požadavky na finanční prostředky, jak bude demonstrováno v následující kapitole zabývající se monitorováním provozu malých družic.

Výše uvedené je krátkým základním přehledem o nejvýznamnějších mezinárodní a národní řídicí subjektů pro oblast vývoje a využívání malých družic, včetně příkladu jak je tomu v České republice.

Pro další studium lze doporučit uvedené odkazy a další, které lze nalézt na internetu.

Pro ověření některých aspektů a znalostí získaných v této kapitole je možné využít následujícího testu ([Příloha č. 1.xlsx](#)).

2 Program CubeSat

V předchozích kapitolách byl mnohokrát uváděn odkaz na standard CubeSat, který byl zcela zásadním a je i do budoucna pro rozvoj malých družic a jejich aplikací. Tato kapitola se věnuje obecnému pohledu na aspekty vývoje standardu CubeSat a příkladům jeho aplikací.

Tato platforma malých družic byla pro potřeby výuky vypracována v roce 1999 ve spolupráci týmu vedeného profesorem Jordi Puig – Suarim z Kalifornské státní polytechnické university San Luis Obispo a laboratoří pro vývoj kosmických programů na Stansfordské universitě vedené profesorem Bobem Twiggsem.

Dnes je rozšířena po celém světě a stal se de-facto standardem, který je používán jak v kosmickém průmyslu, tak v oblasti poskytování kosmických služeb a samozřejmě ve výuce v řadě školních a univerzitních projektů.

Standard CubeSat je akceptován i v oblasti zajišťující za přijatelných finančních nákladů vypouštění nosných raket a dopravních lodí vybavených technologiemi pro umístování malých družic na LEO oběžných drahách.

Tím je otevřena cesta pro všechny zájemce o využívání technologie malých družic, zahrnující i malé školní a univerzitní projekty.

Pro aktuální informace o dění v oblasti standardu CubeSat je možné využívat veřejný portál (<http://www.cubesat.org>).

2.1 Obsah a cíle programu CubeSat

Primárním cílem projektu byla snaha definovat a realizovat standard pro kategorii pikodružic tak, aby byl finančně přijatelný a dosažitelný pro školní, univerzitní projekty kosmických misí a pro projekty soukromých zájmových sdružení s různým užitečným payloadem v podobě různých vědeckých a technologických experimentů.

Dalším cílem bylo vytvoření celosvětové komunity, která by se na bázi široké a dobrovolné spolupráce podílela na dalším rozvoji

Výchozím základem projektu a následně standardu byla pikodružice ve tvaru kostky o rozměrech 10 x 10 x 10 cm s hmotností 1,3 kg. Její konstrukce a příklad vybavení je popsáno v kap. 1.4 na obr. 14 a v následující kapitole.

Součástí vývoje tohoto standardu byly otázky bezpečnosti jak vlastní družice, tak jejího payloadu a vypouštěcího zařízení. To je realizováno prostřednictvím zavedení postupů dobré technické praxe, metod testování a ověřování všech komponent projektu.

Cílem je snížit rizika neúspěchu projektů mise a zajištění dostatečné ochrany dalších umělých objektů v kosmu. Je nutné také brát v úvahu, že existuje vzájemná souvislost mezi poruchami nebo selháním vlastní systémů družice a systémů payloadu. Proto je nutné provádět příslušná opatření již v průběhu návrhu a testování jak z pohledu celkového hardware, tak letového software.

Veškeré požadavky jsou podrobně shrnuty v základním dokumentu CubeSat Design Specification [15].

Na tomto základě se postupe vyvinuly specifikace pro další kategorie jako nanodružice a femto družice.

Základní modul, který je označován jako 1U je základním kamenem pro rozšířené konstrukční modifikace 1U až 12U, jak je patrné z obrázku 37 (viz rovněž obr. 8 v kapitole 1.3).



Obr. 37 Pikodružice modulu 1U a možnosti jejího stavebnicového rozšíření

Volba modulu CubeSat se většinou odvíjí od kompromisu mezi velikostními a hmotnostními potřebami payloadu (tedy počtem a potřebami experimentů nebo aplikací) a z toho plynoucí i požadavky na systémy vlastní malé družice (výkony napájecích zdrojů, velikosti antén,...). Dále pak na způsobu pořízení nebo výroby malé družice, finančními zdroji rozpočtu mise a podmínkami ze strany subjektu, který bude zajišťovat vynesení a umístění malé družice na oběžné dráze a způsob jejího úklidu po skončení mise. To i ve vztahu k případným konstelacím s větším počtem malých družic.

Z hlediska potřeb plánování mise a omezení rizik je žádoucí znát co nejvíce výše uvedených informací. K tomu je vhodné věnovat i pozornost a analýzám výsledků a zkušenost z proběhlých podobných misí.

K tomu všemu lze využít i zapojení se do komunity CubeSat, která se neustále rozrůstá zejména na školách a univerzitách v celém světě. Tato skutečnost ukazuje, že právě záměr programu na vznik komunity CubeSat přispívá k výraznému nárůstu školních a univerzitních projektů misí.

2.2 Základní charakteristiky a prvky družic CubeSat jako standardu pro malé družice

Jak již bylo výše zmíněno lze základní charakteristiky a prvky družic CubeSat nalézt ve specifikaci obsažené v dokumentu [15].

Tato specifikace popisuje následující oblasti konstrukce a testování CubeSat pikodružic, které lze aplikovat i na malé družice kategorie nanodružic nebo femtodružic.

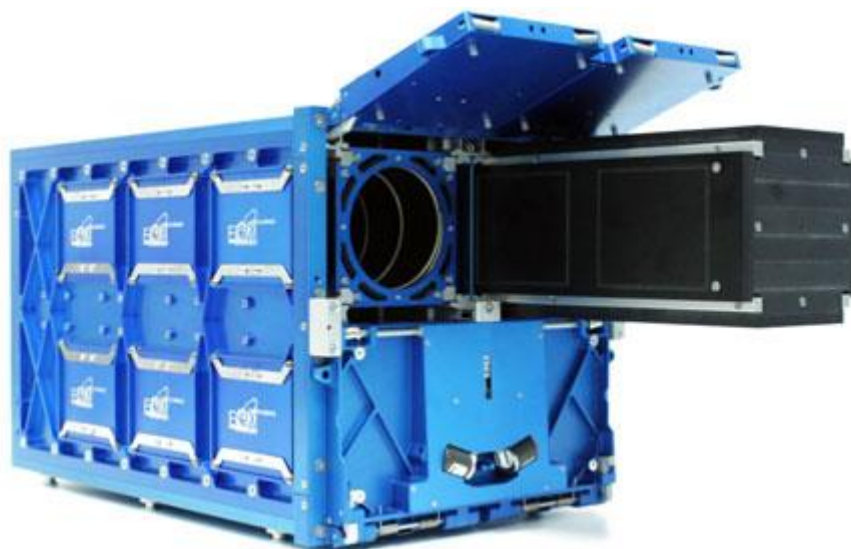
V dokumnetu jsou popsány požadavky na konstrukci vypouštěcího zařízení na oběžné dráze pro minimálně tři malé CubeSat družice. Toto zařízení se označuje jak P -POD (Poly-PicoSatellite Orbital Deployer). Jde o pružinový vypouštěcí mechanismus, který po kolejnici vypustí družici do kosmického prostoru. Přitom musí být zachována kompatibilita pro vypouštění jednotlivých stavebnicových modulů od 1U do 12U.

Příklad konstrukce vypouštěcího zařízení je znázorněn na obr. 38. [15]



Obr. 38 Vypouštěcí zařízení pikodružic CubeSat

Konstrukce je navržena tak, že ji lze stavebnicově rozšiřovat pro více modulů jak ukazuje obr. 39. [16]



Obr. 39 Vypouštěcí modul Cubesat 6U

Vlastní specifikace standardu pikodružice CubeSat popisuje požadavky na:

- **Mechanické prvky** – například, že CubeSat použije pro příslušnou velikost souřadnicový systém, jak je definován v dodatku B. Souřadný systém CubeSat musí odpovídat systému souřadnic vypouštěcího zařízení (P-POD) při jeho integraci do P-POD. Počátek souřadného systému CubeSat je umístěn v geometrickém středu CubeSat.
- **Elektrické prvky** – například, že napájecí systém CubeSat musí být ve stavu vypnutého napájení, aby zabránil aktivaci CubeSat aktivovaných funkcí, zatímco je integrován v P-POD od okamžiku předání do ukončeného umístění na oběžné dráze. Funkce CubeSat zahrnuje celou řadu podsystémů, jako je Command and Data Handling (C&DH), rádiovou komunikaci, polohování - Attitude Determine and Control (ADC), spouštěcí mechanismus. Napájecí systémy CubeSat zahrnují všechny baterie, fotovoltaické (solární) panely a pevné (knoflíkové) baterie.
- **Provozní prvky** – například, že provozovatelé získají a poskytnou dokumentaci řádných licencí pro užívání rádiových kmitočtů, CubeSats bude v souladu s licenčními smlouvami a omezeními svého státu, návrh a provedení mise CubeSats musí být v souladu s NASA požadavky pro omezení orbitálních úlomků uvedené v dokumentu NPR 8715.6.

Dále pak i obsahuje požadavky na testování – kvalifikační a akceptační před předání subjektu pro vynesení a vypouštění malých družic. Ty sestávají z testů náhodných vibrací, tepelných a vakuových klimatických zkoušek, testy šoků a vizuální inspekce.

Příklad konstrukce skeletu CubeSat 1U je na obrázku 40. Jde o testovaný prvek, který lze zakoupit například u společnosti Pumpkin Inc. (<http://www.cubesatkit.com/>).



Obr. 40 Stavěbnice CubeSat IU společnosti Pumpkin Inc.

Tato společnost nabízí dalších základních komponenty pro stavbu družice, vývoj a testování vnitřních a komunikačních systémů a pro podporu stavby payloadu jak ukazuje příklad vývojové desky pro payload na obr. 41. (<http://www.cubesatkit.com/content/datasheet.html>).



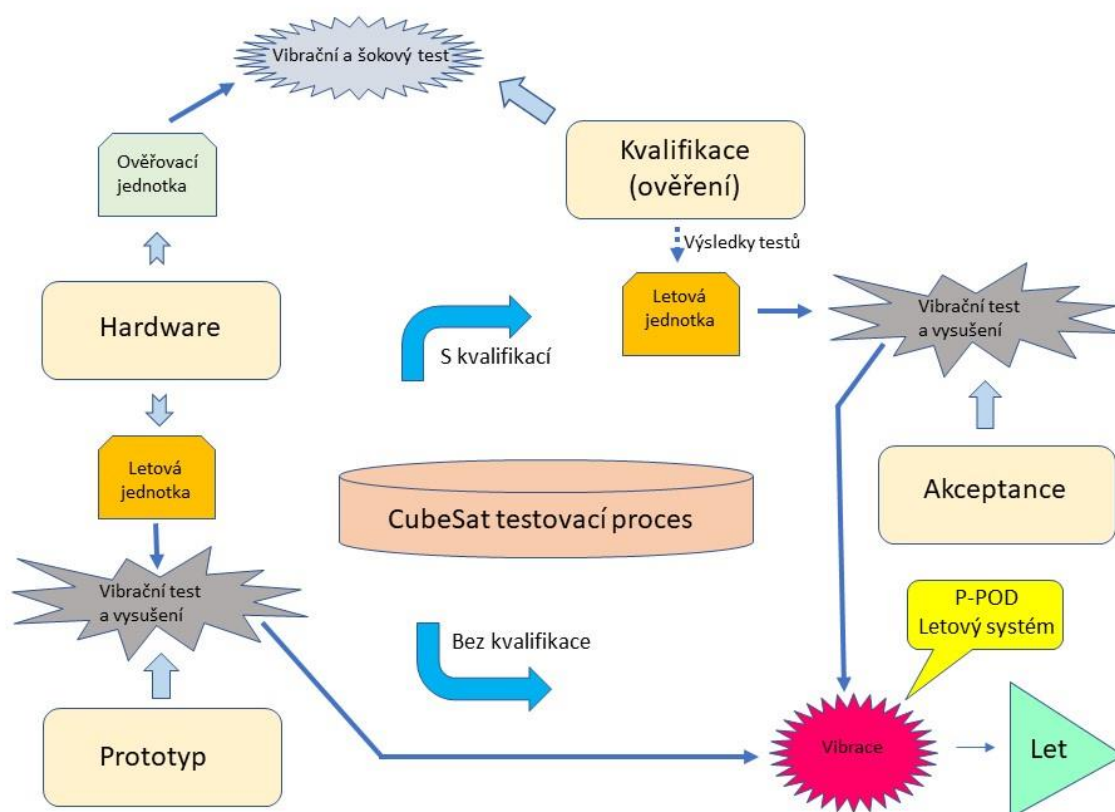
Obr. 41 Vývojová deska payloadu (experimentu) stavěbnice CubeSat IU

Stavěbnice nabízí řadu potřebných komponent a jejich ceny, které lze nalézt na <http://www.cubesatkit.com/content/datasheet.html>

Na proces testování je kladen velký důraz, protože zcela zásadním způsobem ovlivňuje celkový výsledek mise. Případné závady nebo konstrukční chyby je možné před startem včas eliminovat.

Možnosti odstraňování konstrukčních chyb nebo jiných závad jsou na oběžné dráze velice omezené, ne-li nemožné. Například nedostatečná kapacita napájecích zdrojů nebo výkon dobíjecích fotovoltaických panelů se nedá v průběhu mise již plně napravit. Maximálně lze omezit spotřebu snížením frekvence komunikace, počtu korekcí oběžné dráhy, úpravou experimentů a podobně.

Jak již bylo zmíněno, tak standard pro CubeSat obsahuje i metodiku průběhu a obsahu procesů testování (testbed), které ve zjednodušené podobě ukazuje obrázek 42.



Obr. 42 CubeSat testovací proces

Průběh testování podle obr. 42 má dvě cesty. Ty se liší podle toho, zda při stavbě družice CubeSat se nejdříve realizuje ověřovací letová jednotka družice nebo se staví rovnou letová jednotka.

První cesta se používá většinou v případech, kdy se nepoužívá zakoupených a otestovaných komponent. Je to sice finančně náročnější, ale musí se vážit ve světe rizik finančních dopadů při případném neúspěchu mise nebo při způsobení nehody a nutnosti náhrady škod.

Vývoj standardu CubeSat se nezastavil, tak jak se rozvíjí moderní technologie pro stavbu družic a dostupností stavebnic od řady výrobců (viz například <https://blog.bliley.com/top-20-best-cubesat-satellite-manufacturers>).

Veškeré dokumenty vztahující se ke stavbě a provozování jsou i díky celosvětové komunitě CubeSat k volnému dosažení na internetu. Proto při plánování mise je nezbytné vždy je nastudovat a v jejich aktuálním znění.

2.3 Technické prostředky pro plánování, vývoj a simulace provozu malých družic CubeSat

Plánování a vývoj projektů misí s malými družicemi CubeSat může výrazně zefektivnit použití podpůrných dílčích nebo komplexních softwarových simulačních prostředků. Tito simulátory jsou určeny pro testovací fázi (testbed) vývoje projektu.

Cílem simulací je před rozhodováním o technickém a potažmo programovém vybavení dané mise definovat základní a kritické parametry a požadavky na malou družici a její systémy. To s ohledem i na zajištění plánovaných experimentů a aplikací payloadu při simulaci průběhu od startu mise, provozu na oběžné dráze do ukončení mise. Tedy simulace pokrývající celý životní cyklus dané mise.

Například se může ukázat, že navrhovaná výkonová kapacita napájecích zdrojů je nedostatečná vzhledem k provozním podmínkám systémů malé družice na oběžné dráze. Na základě tohoto zjištění se provede posílení napájecích zdrojů nebo úpravě tepelného režimu na družici. Ve svém důsledku to může vést i k tomu že dojde ke zvětšení použitého modulu CubeSat vzhledem k tomu, že bude třeba přidat další akumulátorové baterie.

Taková simulace může podstatně omezit rizika neúspěchu mise a přispět k optimalizaci celkových finančních nákladů na její realizaci.

Jedním z nich produktů, který je využitelný zejména ve školních a univerzitních projektech a ve výuce, je simulátor NASA Operation Simulator for Small Satellites - NOS³ [17]. Je primárně určen pro snadné propojení s letovým softwarem vyvinutým pomocí NASA Core Flight System (cFS). Simulátor NOS³ vytvořil tým NASA Independent Verification and Test Capability pro CubeSat U3 pojmenovaný jako -Simulation-to-Flight (STF-1).

Software simulátoru NOS³ je volně dostupné ke stažení na internetu (<http://www.stf1.com/NOS3Website/Nos3MainTab.html>). Na této stránce je i kompletní dokumentace využitelná pro další vlastní vývoj svých simulačních aplikací.

Tento simulační software je typu „open – source“, využívá Linux knihoven a spustitelných souborů. Simulace vycházejí ze současných modelů hardware využívaných v malých družicích CubeSat. Tedy i modelů hardware realizovaných z běžně dostupných komponent a součástek, které nejsou produkcí kosmického průmyslu. Lze ho provozovat i na operačním systému Microsoft Windows 10.

Simulace probíhá na virtuální počítači „Unbutu Linux virtual machine“ s komunikací pomocí grafického uživatelského rozhraní (GUI) běžícím na jakémkoliv dostatečně vybaveném PC

(především s RAM více jak 16 GB). Pomocí tohoto prostředí je simulace sestavována, řízena a výsledky analyzovány.

Simulátor NOS³ lze využít pro následující úlohy:

- výchozí návrh letového software (FSW) prostřednictvím reálných vstupů,
- testování FSW v jednotlivých fázích vývoje a jeho úprav,
- integraci komponent FSW pro návrhy aplikací u payloadu.

Plánování mise ověřováním jejích komponent a možností provádění analýzy výsledků simulací (například analýza elektrického napájecího systému vlastní družice ve spojení s plánovaným payloadem, ...).

Základní komponenty simulátoru NOS³ tvoří:

Oracle VirtualBox and Vagrant

Oracle VirtualBox je open source software pro vytváření a provoz virtuálních počítačů.

Vagrant je open source software, které lze použít ke skriptování tvorby virtuálních počítačů (strojů) Oracle VirtualBox a poskytování těchto počítačů, včetně instalace balíčků, vytváření uživatelů, manipulace se soubory a adresáři atd.

NOS Engine

NASA Operational Simulator (NOS) Engine je NASA vyvinuté řešení pro simulaci hardwarových sběrnic jako sběrnice pouze softwaru. Tato komponenta poskytuje konektivitu mezi letovým softwarem a simulovanými modely hardwarových komponent malé družice CubeSat.

Simulated Hardware Components

Soubor simulovaných hardwarových komponent (jejich software modely), které se připojují k NOS Engine a poskytují hardwarový vstup a výstup do letového softwaru.

Software 42

Některé hardwarové komponenty vyžadují dynamická data prostředí v němž jsou komponenty a systémy na malé družici provozovány. Software 42 je nástroj pro vizualizaci a simulaci otevřených zdrojových kódů pro kosmickou loď a dynamiku na oběžné dráze vyvinutý NASA Goddard Space Flight Center (GSFC), který slouží k poskytování dynamických dat prostředí (okolí) působící na malou družici (například data magnetického pole, pozice na oběžné dráze jako vstupy do simulátoru magnetometru nebo GPS).

Letový software cFS

NASA Core Flight Software (cFS) je používán jako základní systém, který je navržen na letovém softwaru NASA STF-1.

COSMOS

COSMOS je open source pozemní systémový software vyvinutý firmou Ball Aerospace, který slouží k řízení na pozemní stanici a řízení letového softwaru.

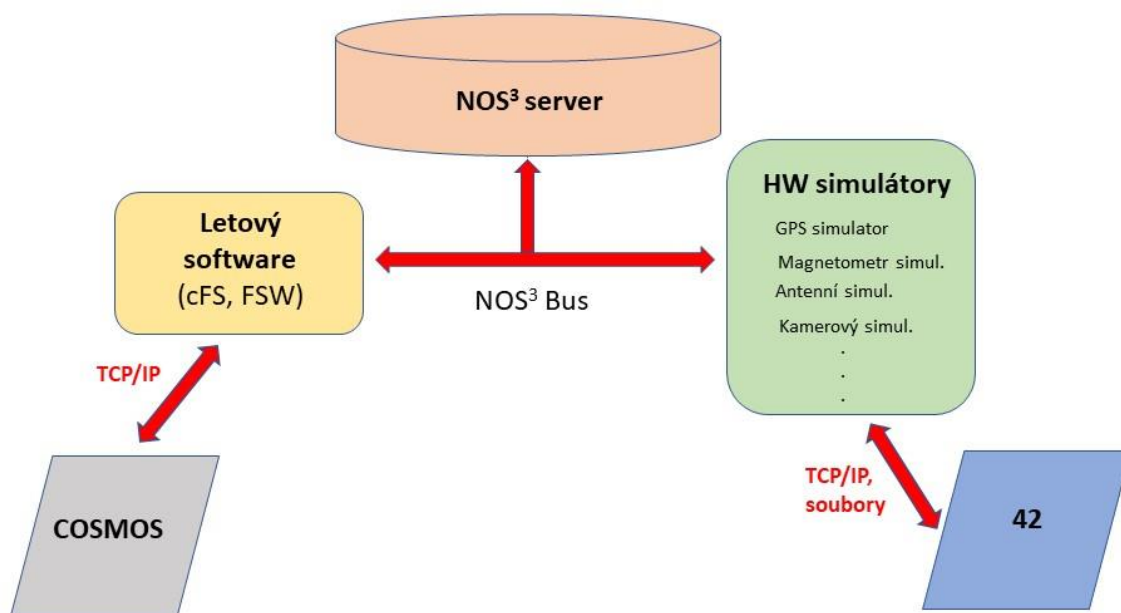
OIPP

Orbit, Inview a Power Planning (OIPP) je vyvinutý plánovací nástroj, který může používat současné sady prvků TLE (two line elements popisující pohyb družice na oběžné dráze kolem Země) z internetu nebo souboru TLE pro projektování časů zobrazení malých družic na pozemní stanici, pro zatmění družice a časů slunečního světla.

COSMOS File Creator (CFC)

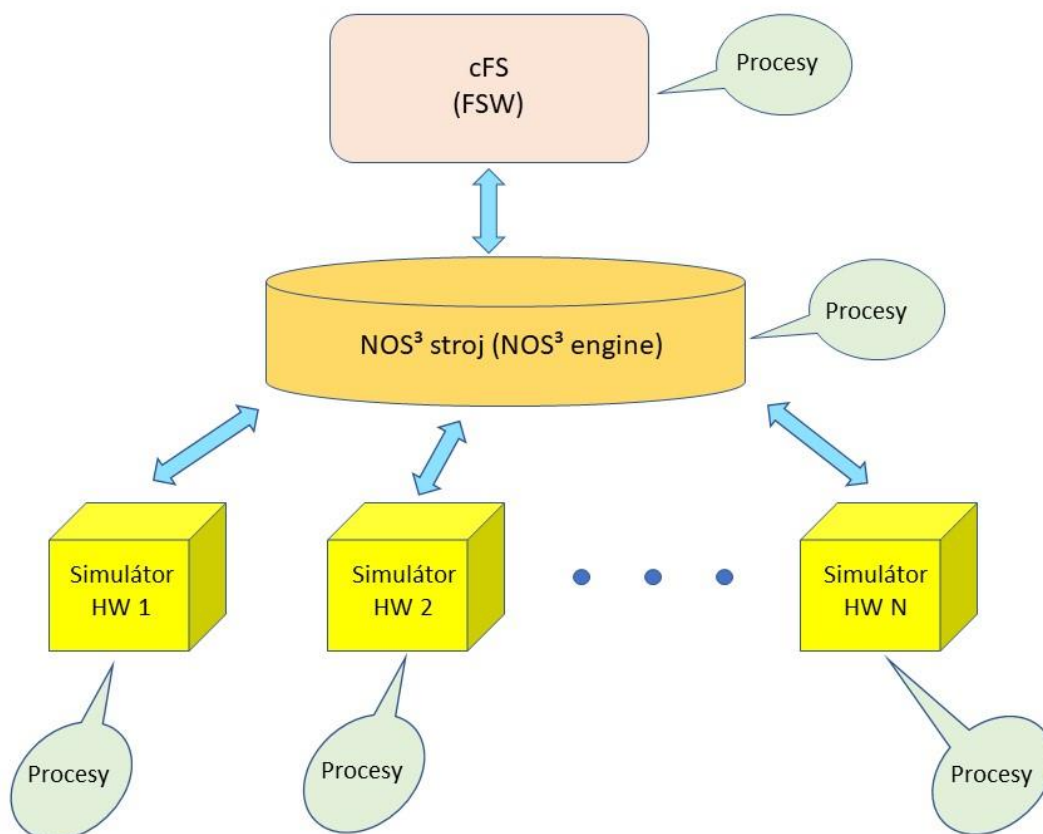
CFC umožňuje generování příkazů a telemetrických souborů z letového software FSW, blokování obsahuje správné komentáře, které mají být analyzovány.

Architektura software NOS3 je zobrazena na obr. 43.



Obr. 43 Architektura simulátoru NOS³

Jednotlivé komponenty software v architektuře Linux jsou ve zjednodušené formě znázorněny na obr. 44.



Obr. 44 Architektura NOS3 v operačním systému Linux

Simulátor NOS³ se nadále vyvíjí a díky volně přístupnému kódu je možné si ho rozvíjet i podle vlastních specifických potřeb. Tedy na vytvářených modelech hardware nebo interfejsů zahrnutých do simulačního software systémů malé družice v rámci procesů simulátoru NOS³. V současné době je v první verzi NOS³ [18] k dispozici simulační software pro magnetometr Honeywell HMC58453 (FSW zdrojový kód pro vývoj), elektrický napájecí systém Clydesoace Gen III (analýza napájecího systému a software řízení spínačů), GPS od Novatel (FSW zdrojový kód pro vývoj a povelování GPS) a kameru ArduCam Mini OV2640 SPI/I2C (FSW zdrojový kód pro vývoj a výměnu velkých paketových dat).

Ukázka kompletního uživatelského prostředí simulátoru NOS³ se zobrazením jeho komponent je na obr. 45. [17]



Obr. 45 Ukázka uživatelského prostředí simulátoru NOS3 v prostředí operačního systému Linux

Vývoj simulátoru pokračuje za účasti Cubesat komunity se zahrnutím simulačních modelů hardware pro 3 osy gyroskop, teplotní senzory, UHF radiový vysílač a přijímač, uživatelský interface pro vizualizaci, integraci s pozemním software (COSMOS a ITOS) se software 42.

Zásadním aspektem využití a přínosu simulátoru NOS3 je možnost simulace mise ve fázi návrhu a plánování pro celý životní cyklus (stavba, testování, vypuštění, provoz, úklid po ukončení) s minimálními finančními náklady. Získané výsledky lze využít pro případné úpravy hardware i software systému družice a payloadu ještě před tím, než dojde k vlastní stavbě a následujícímu testování komponent a celku malé družice.

Pomocí tohoto simulátoru lze také zpřesnit i odhady na jednotlivé položky finančního rozpočtu mise pro fáze konstrukce malé družice a jejího payloadu a provozu. To vše rovněž vytváří dobré předpoklady pro úspěch mise.

Navíc díky tomuto simulátoru lze výrazně zefektivnit i výukový proces už i na úrovni středních škol. V počátku tedy není třeba nijak nákladného vybavení pro teoretickou a praktickou výuku. Stačí k tomu osobní počítač nebo notebook s pamětí RAM alespoň 16 GB. Linux software a jeho knihovny jsou volně ke stažení a využití.

Detailnější informace k popisovanému simulátoru a jeho využití lze nalézt v uvedené literatuře [17] a [18].

2.4 Příklady projektů založených na standardu CubeSat

O řadě příkladů projektů založených na standardu malých družic Cubesat, jejich konstrukce a vybavení bylo pojednáno v předchozích kapitolách. Výběr příkladů projektů založených na využívání standardu CubeSat není jednoduchou záležitostí. To zejména z důvodu obrovského počtu ať již probíhajících misí nebo připravovaných dnes již nejen na univerzitách, ale i na středních školách nebo rozsahem velkých projektů jako je například OneWeb.

Proto se zde budeme věnovat stručnému popisu základních charakteristik dvou typických projektů, které dokumentují možnosti a potenciál malých družic využívajících standard Cubesat s ohledem na zaměření tohoto materiálu do prostředí středních škol. Podrobný popis jednotlivých dílčích projektů, které jsou součástí projektu QB 50 přesahuje rámec tohoto materiálu a lze je nalézt v dále uvedených odkazech.

Prvním z nich, který má výrazný podíl na zavádění a rozvoj technologie malých družic v prostředí univerzit (a potažmo i do středních škol) a spin-off podniků (typ malých podniků pro transfer vědeckého výzkumu do komerčního využití) využívajících malých družic, je evropský projekt označovaný jako QB 50. Projekt je podporovaný Evropskou komisí v rámci 7 rámcе EU výzkumu a technologického rozvoje na roky 2014 až 2020.

Cíle mise QB 50 jsou směřovány do těchto čtyřech oblastí:

- vědecký výzkum,
- usnadnění přístupu do kosmu,
- platforma pro technologické aktivity na oběžné dráze,
- výuka.

Cílem bylo postupně vytvořit mezinárodní síť s konstelací až 50 malých družic CubeSats modulu U2 nebo U3 (nanodružice), s tříletým životním cyklem a s vědeckým payloadem pro vícebodová měření přímo (in-situ) v nižší termosféře a jejich kontinuální opakování v čase. Tento projekt EU řídí Institut von Karman (Rhode-Saint-Genèse, Belgie). V konsorcium projektu je 15 významných univerzit z 23 států.

Současně projekt mise QB50 má ukázat na možnost realizace sítě malých družic CubeSats, která je vytvořena univerzitními týmy po celém světě pro provedení vědeckého výzkumu v převážně neprozkoumané nižší termosféře ve výškách od 200 km do 380 km.

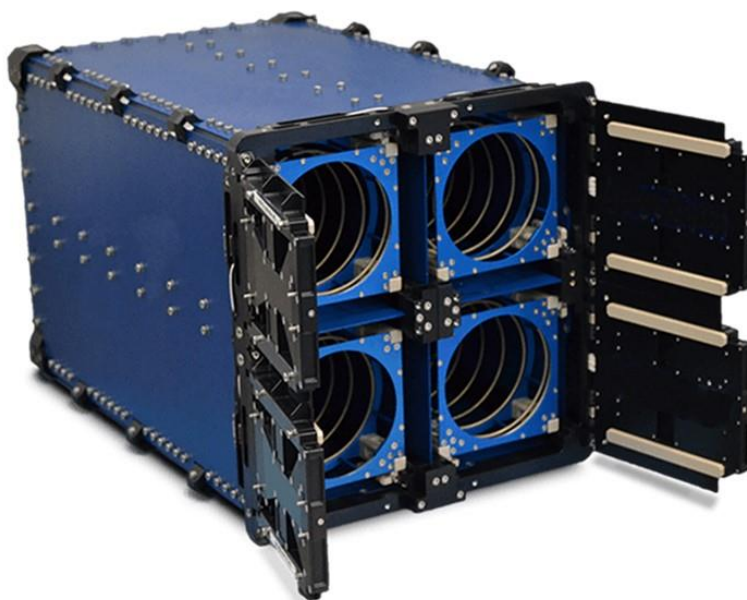
Vícebodová měření pomocí QB50 tvoří doplněk k současnému výzkumu prováděných pomocí vypouštění zvukových raket a jejich sledování na družicích, které provádějí pozorování Země. Výsledky získané v rámci projektu OB 50 nají přispět k vývoji přesnějších modelů nižších vrstev termosféry.

Pro tato měření se využívají tři různé typy senzorů, z nichž každý je součástí určitého souboru tří sad vědeckých experimentů. Jako senzorů se používá iontově neutrálního hmotnostního spektrometru (INMS), který je součástí sady 1, magnetický Flux- Φ -sondový experiment (FIPEX) jako součást sady 2 a vícejehlové Langmuirovy sondy (m-NLP) jako součást sady 3. V každé z nich je dále měřicí zařízení pro teplotní měření pomocí odporových teplotních detektorů (RTD), termistorů nebo bimetalových senzorů (TH).

Vedle vlastního vědeckého výzkumu je součástí projektu vývojem speciálního vypouštěcího rozhraní pod názvem QuadPack pro umístování na oběžné dráze. Tento systém je již ověřen na oběžné dráze a má sloužit jako jistá standardizovaná platforma pro poskytovatele vynášení malých družic do kosmu.

QuadPack je konstrukčně multifunkční zařízení s jednoduchými a flexibilními rozhraními a konfigurací s ohledem na malé družice CubeSat a nosné rakety. Během startu jsou malé družice CubeSat plně uzavřeny v tomto QuadPack a jsou vypouštěny do prostoru na povel vypouštěcího zařízení na dopravním prostředku na oběžné dráze.

Příklad konstrukce vypouštěcího zařízení QuadPack vyrobené fy. ISIS pro CubeSat projektu QB 50 je na obr. 46 (<https://www.isispace.nl/product/quadpack-cubesat-deployer/>).



Obr. 46 Konstrukce vypouštěcího zařízení platformy QuadPack fy. ISIS

Vývoj těchto QuadPacků je prostředkem pro udržitelnou podporu přístupu do kosmu, je věřen (kvalifikován) pro velký počet modulů CubeSat a je schopen letět na mnoha opakovaných startech misí malých družic.

Pro vypouštění je využívána především mezinárodní kosmická stanice ISS, na kterou malé družice dopravuje raketa Atlas V (Kalifornie) dopravních prostředků PSLV (Polar Sun Launch Vehicle) vynesných indickou nosnou raketou Indické kosmické agentury (ISRO).

Dalším cílem projektu QB50 je sloužit jako platforma pro demonstraci technologií. Část QB50 CubeSats payloadu, která neobsahuje senzory pro vědu, jsou především technologie, určené pro použití v kosmu. Dva z těchto CubeSats - QARMAN a InflateSail - které jsou součástí konsorcia QB50 a demonstrují tento cíl a poslání projektu.

V oblasti výuky mise QB50 představuje výzvu pro univerzity ke spolupráci a zapojení se do stavby a vysílání malých družic do kosmu. V rámci této výzvy byla vybrána do QB 50 řada projektů, které byly navrženy a vyrobeny velkým počtem mladých inženýrů. Ty pod dohledem zkušených pracovníků na jejich univerzitách a řízeny projektem QB50 prostřednictvím recenzí a zpětné vazby.

Pozemní segment pro QB 50 je tvořen 50 pozemními amatérskými stanicemi, centrálním serverem DPAC (Data Processing and Archiving) pro TLE data, WOD (Whole Orbit Data), sběr dat z vědeckých experimentů a archivaci. Pro rádiovou komunikaci jsou využívána amatérská pásma na vlnových délkách 2 m (145 MHz) 70 cm (435 MHz) a 6 cm (1.23 GHz) s digitální modulací většinou GMSK (Gussovská modulace s minimálním zdvihem užívaná v mobilních sítích GSM) s přenosovými rychlostmi do 9600 bit/sec.

Pomocí sledovacích programů jako je například Orbitron nebo Gpredict je možné na internetu sledovat pohyb jednotlivých družic. S použitím přijímačů SDR nebo internetových dekodérů (pokud je daný projekt poskytuje) pak i živě přijímat sluchem signály a případně dekodovat vysílaná data. To vše představuje pro zájemce o malé družice dobrý studijní i výukový materiál.

Přínosem je, že vedle teoretických znalostí získávají inženýři i praktické zkušenosti jak při stavbě družice, testování a vlastním provozu. se neučili jen o teorii vesmíru, ale opustili své univerzity praktickými zkušenostmi. Navíc se ukazuje, že mise QB 50 otevřela i dveře dnešním projektům středních škol a malých zájmových sdružení, spin-off nebo různých start-up podniků vznikajících za podpory univerzit.

V současné době bylo již uskutečněno již 48 misí tohoto projektu a další jsou plánovány. Jednou z nich je i projekt první české nanodružice, o které bude podrobněji psáno v následující kapitole 2.5.

Informace o dílčích projektech misí, které jsou zahrnuty do projektu QB a jejich aktuálním stavu lze nalézt na internetových stránkách <https://www.qb50.eu/index-2.html> a na <https://upload.qb50.eu/> a v mnoha dalších, které se týkají konkrétních dílčích projektů v rámci QB 50. K tomuto projektu se každoročně pořádá řada konferencí a seminářů.

Druhý příklad projektu mise dokumentuje, jak ohromný potenciál se skrývá v technologii malých družic a jakém množství se otvírají všem zájemcům o kosmos pro jejich životní kariéru budoucích odborníků žákům již od základní školy. Je také dokladem toho, že díky malým družicím přístup do kosmu a jeho využívání ztrácí na své gloriole nedostupnosti a výjimečnosti určené dříve jen pro velké vládní kosmické agentury nebo korporace první generace kosmického průmyslu.

Výše uvedené skutečnosti potvrzuje projekt realizovaný v americké základní škole St. Thomas More Cathedral School v Arlingtonu (stát Virginia) v letech 2014 – 2017 (<https://www.nasa.gov/feature/first-cubesat-built-by-an-elementary-school-deployed-into-space>). Cílem bylo vyslání malé družice CubeSat modulu U1 pojmenované jako STM Sat-1 . Tento projekt mise realizovaný na základní škole byl uskutečněn jako první ve světě.

Cílem mise bylo umožnit žákům získat teoretické znalosti a praktické dovednosti spojené s provozem malé družice na oběžné dráze s payloadem pro fotografování Země a přenos obrazů a jejich zpracování na vlastní pozemní stanici a dalších spolupracujících pozemních stanic v USA a ve světě.

Na projektu pod vedením Joe Pellegriniho (NASA Goarde Space Flight Center) se podílelo 400 žáků školy. J. Pellegrini působil jako mentor ve všech fázích vývoje mise od montáže malé družice, její testování, integraci až po vypuštění.

Ve všech těchto fázích se žáci školy pod jeho vedením měli možnost se aktivně zúčastnit a podílet se na realizaci této mise. Přitom se naučili spoustu dovedností z oblasti elektroniky. Jako například pájení součástek, užívání antistatické ochrany součástek, manipulace s jemnými součástkami.

Pro testování návrhu hardware malé družice před vlastní stavbou STMSat-1 bylo využito letů dvou stratosférických balónů. Žáci postavili pozemní stanici a na ní se při těchto letech seznamovali s provozem v amatérských pásmech a simulovali rádiovou komunikaci s připravovanou malou družicí.

STMSat-1 měl na palubě kameru pro pozorování Země, rádiovou amatérkou radiostanici, napájecí zdroj, palubní počítač anténu, destičku s podpisy týmu mise a kříž posvěcený papežem Františkem.

Pro vypuštění postavené malé družice na oběžnou dráhu se tomuto projektu podařilo získat místo v rámci výzvy NASA CubeSat Launch Initiative spolu s dalšími 16 organizacemi.

STMSat-1 byla dne 6. prosince 2015 vynesena na palubě kosmické lodi Orbital ATK Cygnus na mezinárodní kosmickou stanici ISS. Pro umístění na oběžnou dráhu dne 16. května 2016 bylo ve výšce 402 km použito vypouštěcího zařízení NanoRacks CubeSat Deployer (NRCSD). Zhruba po 30 minutách byly aktivovány vnitřní systémy a bylo navázáno rádiové spojení s pozemní stanicí.

Na obrázku 47 je zobrazena STMSat-1 na oběžné dráze



Obr. 47 První školní družice STMSat-1 na oběžné dráze

Snímané obrazy z nesené kamery kódovány systémem amatérské pomalé televize SSTV pomocí zařízení Robot36 měly být vysílány s kmitočtovou modulací (FM) na kmitočtu 437,800 MHz na pozemní stanici.

Bohužel tuto část mise se nepodařilo naplnit. Přestože se STM-1 stále pohybuje na oběžné dráze, tak se žádný obraz doposud nepodařilo na pozemní stanici přijmout.

Přesto všechno je třeba považovat tuto pionýrskou školní misi za úspěch. Jednak mnoha žákům této školy umožnila kariéru v řadě technických oborů spjatých s kosmem. Rovněž byla velkou inspirací pro mnoho dalších školních a univerzitních projektů misí malých družic CubeSat. Současně podnítila nalézat podporu jak od subjektů poskytujících dopravu a vypouštění

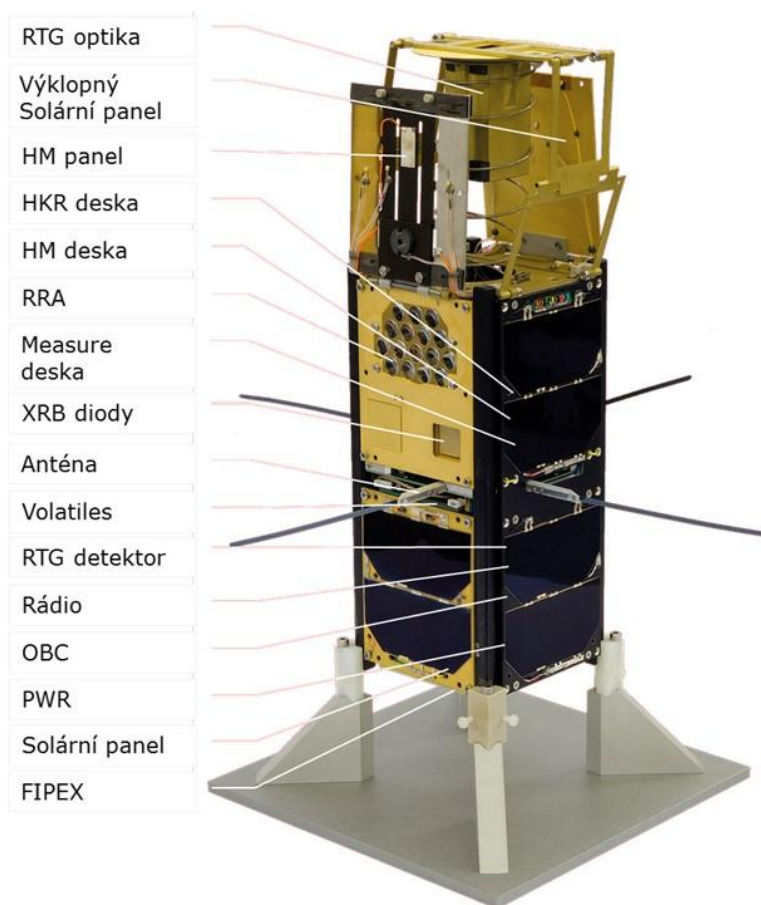
malých družic CubeSat na oběžnou dráhu, tak i nového kosmického průmyslu pro výrobu stavebnic a dalších potřebných komponent. V neposlední řadě pak přispěla i k rozvoji standardu CubeSat.

2.5 První česká družice CubeSat – VZLUSAT-1

V předchozí kapitole byly popsány dva příklady projektů misí malých družic vycházejících ze standardu CubeSat.

Ani Česká republika nezůstává stranou na poli vysílání malých družic do kosmu. Na indickém kosmickém polygonu Šríharikota dne 23. června 2017 startuje indická nosná raketa PSLV-C38 s první českou nanodružicí VZLUSAT-1 postavenou na standardu CubeSat [18].

Mise nanodružice VZLUSAT-1 je součástí již dříve pospaného projektu QB-50. Proto jednou částí jejího payloadu je zařízení pro výzkum termosféry v rámci experimentu FIPEX. Dále pak jsou to další zařízení pro vědecké a technologické experimenty. Ty mají sloužit k ověření (kvalifikaci) produktů a technologií na LEO oběžné dráze. Jejich umístění a konstrukce nanodružice jsou zobrazeny na obr. 48 [18].



Obr. 48 Konstrukce VZLUSAT-1 a umístění jednotlivých komponent jejího payloadu

Nanodružice VZLUSAT-1 byla vyvinuta ve Výzkumném a zkušebním leteckém ústavu v Praze (VZLÚ) v rámci konsorcia se Západočeskou universitou v Plzni, FEL ČVUT v Praze a technologickými společnostmi Rigaku, 5M, HVM Plasma, TTS a IST. Finanční podpora byla poskytnuta Technologickou agenturou ČR. Vývoj probíhal od roku 2009 v rámci prvotního projektu Pilsen Cube [19].

Základní parametry nanodružice VZLUSAT-1 jsou:

- CubeSat 2U – hmotnost 2 kg, rozměry 10 x 10 x 20 cm ve startovní konfiguraci a 10 x 10 x 35 cm na oběžné dráze v rozvinutém tvaru (rentgenový teleskop a výklopné solární (fotovoltaické) panely).
- Registrace v systému NORAD je pod číslem 427090.
- Polární oběžná dráha s inklinací 98° SSO (Sun-synchronous orbit) ve výšce 510 - 520 km, průměrná doba oběhu 95 minut.
- Rádiová komunikace s výkonem 1 W.
- Rádiový maják - dvoustavový audio signál 600 Hz s modulací nosné FM na kmitočtu 437,240 MHz vysílající zprávu se jménem a stavovými telemetrickými parametry systémů družice (OBC WOD) s periodou 60 sec.
- Přenos dat z experimentů v CubeSat paketovém protokolu s modulací MSK (klíčování s minimálním kmitočtovým posuvem) na nosném kmitočtu 437,240 MHz pomocí SDR vysílače Gomspace NanoCom U482C.
- Palubní počítač (OBC - On Board Computer) hardware využívá jádra procesoru LEON3FT a řízených sériových sběrnic I2C. OBC a letové software obsahuje operační systém FreeRTOS, Cubesat Space Protocol (CSP), řízení I2C a aplikační software payloadu.

Primární pozemní stanice je umístěna na střeše budovy elektrotechnické fakulty Západočeské university v Plzni. Přenášená data jsou dále přijímána řadou spolupracujících sekundárních pozemních stanic v rámci projektu QB 50.

Umístění pozemní stanice v Plzni umožňuje aktivní komunikaci a sledování v rozsahu od 5 minut do 11 minut při oběhu 95 minut v závislosti na trajektorii dráhy nanodružice VZLUSAT-1.

Pozemní stanice je vybavena rotujícím anténním systémem pro azimut a elevaci s anténou typu YAGI (zisk 14,1 dBi) pro vlnové pásmo 70 cm (UHF), radioamatérskou vysílací a přijímací stanicí ICOM IC 910H s výkonem 510 W a počítačem se softwarem pro řízení provozu nanodružice VZLUSAT-1 a zpracováním přijímaných dat a propojením na počítačovou síť LAN pro připojení spolupracujících subjektů.

Veškerá rádiová komunikace, sledování a další informace o tomto projektu jsou přístupné na internetové stránce mise VZLUSAT-1 (<https://www.pilsencube.zcu.cz/vzlusat1/>).

Payload VZLUSAT-1 je tvořen těmito experimenty a zařízeními:

- Rengentový teleskop s optickým částicovým detektorem TIMEPIX pro měření ionizujícího záření Slunce a pro měření spekter radiace kolem Země (vědecký experiment), který je součástí projektu FIPEX v rámci OB 50.
- Měřicí zařízení pro měření stínících vlastností kompozitního materiálu (technologický experiment). Využití těchto materiálů se předpokládá u raket pro dlouhodobé lety s posádkou a stavbu objektů obývaných lidmi na jiných planetách (Měsíci, Marsu).
- Koutový odražeč pro přesné laserové měření vzdálenosti k malé družici.

Ačkoliv plán mise nanodružice VZLUSAT-1 měl mít životní cyklus dlouhý 1 rok, tak i dnes v roce 2019 je tato nanodružice funkční a experimenty dále pokračují. Což je velice cenný a vynikající výsledek ve srovnání s mnoha dalšími obdobnými misemi. Zapojení řady studentů přispělo i ve výuce na elektrotechnické fakultě Západočeské univerzity.

Získané výsledky a poznatky významně přispěly k řešení projektu FIPEX v rámci QB 50. Rovněž tak výsledky technologických experimentů jsou přínosem a inspirací pro další projekty misí malých družic.

Úspěch projektu mise VZLUSAT-1 rovněž svědčí mimo jiné i o jejím dobrém plánování a řízení projektu, vhodném výběru a provedeném testování jednotlivých komponentů a celku této nanodružice a také špičkové erudovanosti týmů tohoto konsorcia.

V současnosti (rok 2022) jsou na oběžných drahách další české malé družice – VZLUSAT-2, BDSat a Planetum-1.

2.6 Záměr na vybudování univerzitní sítě pro potřeby vědy a výuky na ČVUT v Praze

Technologie malých družic nezůstává mimo zájem na nejstarší české technické univerzitě. Kromě spolupráce elektrotechnické fakulty ČVUT v Praze (FEL ČVUT) na misi první české nanodružice VZLUSAT-1 jde i o navázání na řadu národních a mezinárodních projektů spojených s vědou, výzkumem a výukou v kosmu.

ČVUT v Praze rozhodně není nováčkem ve spojení s vývojem, provozem a vědeckými experimenty a mezinárodní spolupráce využívajících družic a dalších kosmických technologií včetně odborně zaměřené výuky.

Elektrotechnická fakulta (FEL ČVUT) má dlouhodobé aktivity v oblasti projektů ESA, TAČR, MD ČR a NASA, které jsou zaměřovány na programy misí velkých družic v oblasti technologií a vědeckých programů nebo na problematiku družicových navigačních systémů a řešení problematik podmínek a modelování šíření a interferencí elektromagnetického vlnění, plánování misí apod.

V oblasti výuky je roku 2010 na FEL akreditován magisterský studijní obor "Letecké a kosmické systémy" (LeKS), který je součástí programu Kybernetika a Robotika. Příprava odborníků v oblasti kosmického inženýrství probíhá v evropském magisterském programu SpaceMaster (<http://spacemaster.eu/>).

V roce 2015 bylo ve spolupráci s ITU a Českou kosmickou kanceláří uskutečněno první celosvětové symposium a workshop na témata spojená s vývojem a aplikacemi malých družic v oblasti telekomunikací. Výstupem byla Pražská deklarace o rozvoji malých družic. O úspěšnosti akce svědčí vysoké hodnocení od účastníků a ITU. Rovněž tak zařazení této problematiky do programu pracovních skupin v rámci COPUOS.

V souvislosti s trendy v oblasti rozvoje misí malých družic ve spojení s vědou a výukou je nezbytné přistoupit vedle současných aktivit v různých projektech a konsorciích k vybudování vlastní sítě malých družic. Ta by měla umožnit realizaci vědeckých projektů napříč všemi fakultami a prohloubení teoretické a praktické výuky studentů v oblastech dotýkajících se výzkumu kosmu a kosmického průmyslu. To ve spojení zejména s postupným zaváděním robotizace a aplikací umělé inteligence, aplikace internetu věcí (IoT), mobilními vysokorychlostními sítěmi 5G, bezpečnosti rádiové komunikace v kosmu a senzorickém monitorování atmosféry a klimatu Země.

Pro tyto účely je navrhováno vybudování družicové sítě CVUT-S1 v konstelaci dvou nanodružic Cubesat 2U nebo 3U.

Prvním krokem bude vybudování pozemní stanice, která umožní se přímo zapojit do dalších misí mezinárodních konsorcií zejména v rámci ESA. Zároveň ji bude možné využívat v rámci výuky ve fakultních programech a předmětech, kterých se to dotýká.

Již dnes je stavebně připravena lokalita pro anténní systém na střešní zástavbě FEL ČVUT v Praze – Dejvicích. Pozemní stanice umožní teoretické a praktické experimenty spojené s příjmem, vysíláním a zpracováním telemetrických dat z aktivních misí malých družic vysílajících v pásmech 2 m a 70 cm (případně 23 cm).

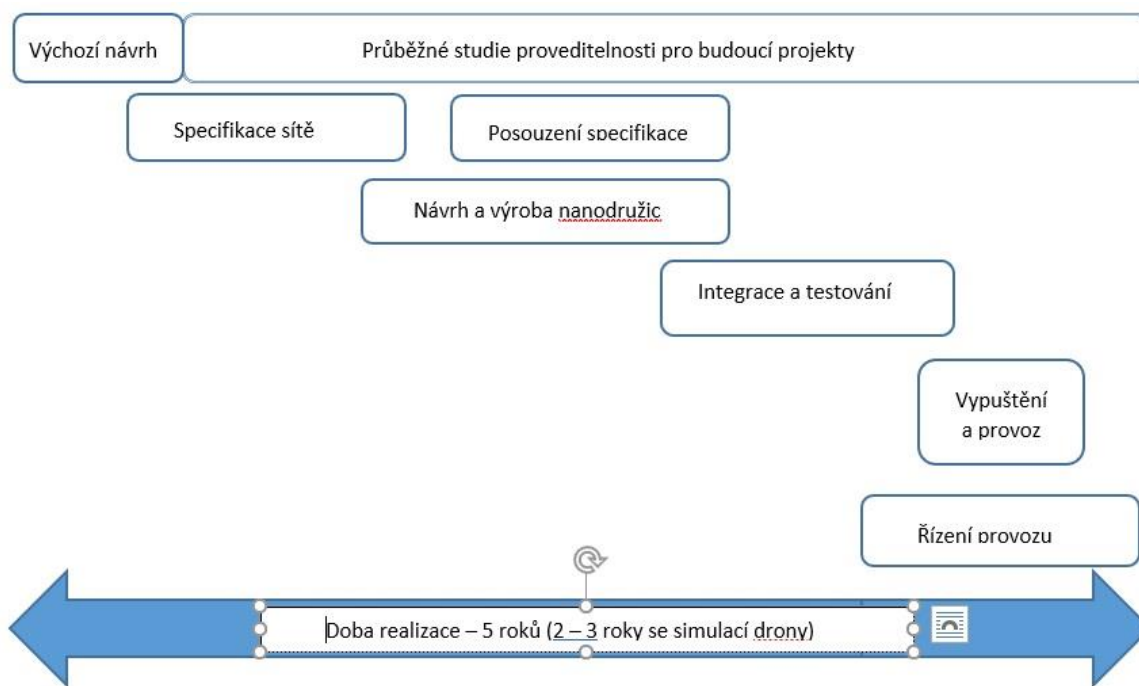
Základní vybavení ve výchozím fázi jejího vývoje bude tvořeno:

- anténní systém tvořený anténami typu YAGI ve vlnovém pásmu 2 m (7 prvků) a 70 cm (14 prvků), azimutálním a elevačním rotátorem a ovládací jednotkou řízenou z volně dostupného sledovacího software G-predict,
- SDR přijímač Win Radio WR-305 s rozhraním USB a Ethernet,
- notebook (dostačuje konfigurace - i5, RAM 8 GB, HDD min. 500 GB, OS Windows nebo Linux) s volně dostupným software HDSDR a sledovacím programem G-predict.
- Odhad počátečních investičních nákladů na pořízení minimálního vybavení je ve výši 60 tis. Kč.

Základními parametry specifikující tento misi sítě CVUT-S1 jsou:

- Použití standardů CubeSat obsažených v dokumentu – ECSS-M-ST-10 C modulu 2U nebo 3U s hmotností do 10 kg a s minimální životností 3 roky.
- Využití nízké polární oběžné dráhy LEO ve výškách od 500 km do 1000 km se sklonem do 98°.
- Pro komunikaci a řízení využívat digitálních komunikačních technologií SDR v koordinovaných kmítových pásmech 137 – 138 MHz přidělených Radiokomunikačním řádem ITU družicové pohyblivé službě pro LEO systémy, případně 148 – 150,05 MHz (vzestupný směr) a 400,15 – 401 MHz (sestupný směr) pro družicovou pohyblivou službu. Případně i využití kmítových přidělů nepodléhajících koordinaci v pásmech 144 – 146 MHz (2 m), 432 – 438 MHz (70 cm) a 2300 – 2450 MHz (23 cm) pro amatérskou družicovou službu. Při volbě kmítového pásma bude nutné zohlednit příslušné výstupy z agendy Světové radiokomunikační konference ITU – WRC 19 (listopad 2019).
- Pro vývoj, testování a simulaci letového software a hardware využít produktu NASA – NOS³ popsaného v kap. 2.3
- V oblasti simulace mise sítě CVUT-S1 a pro návrh a testování prototypů payloadu (vědeckých a technologických experimentů) použití sítě létajících zařízení (dronů).

Jednotlivé fáze projektu sítě CVUT-S1 jsou pro představu přehledově uvedeny na obrázku 49.



Obr. 49 Fáze vývoje a realizace mise sítě CVUT-S1

Finanční rozpočet (hrubý odhad): bez vypuštění družic – 10 mil. Kč, s vypuštěním 30 mil. Kč

Předpokládané finanční zdroje: MŠMT, MPO, MV, MO, granty, ESA (ARTES), EU – QB 50, rozpočet v rámci spolupráce v mezinárodních konsorciích.

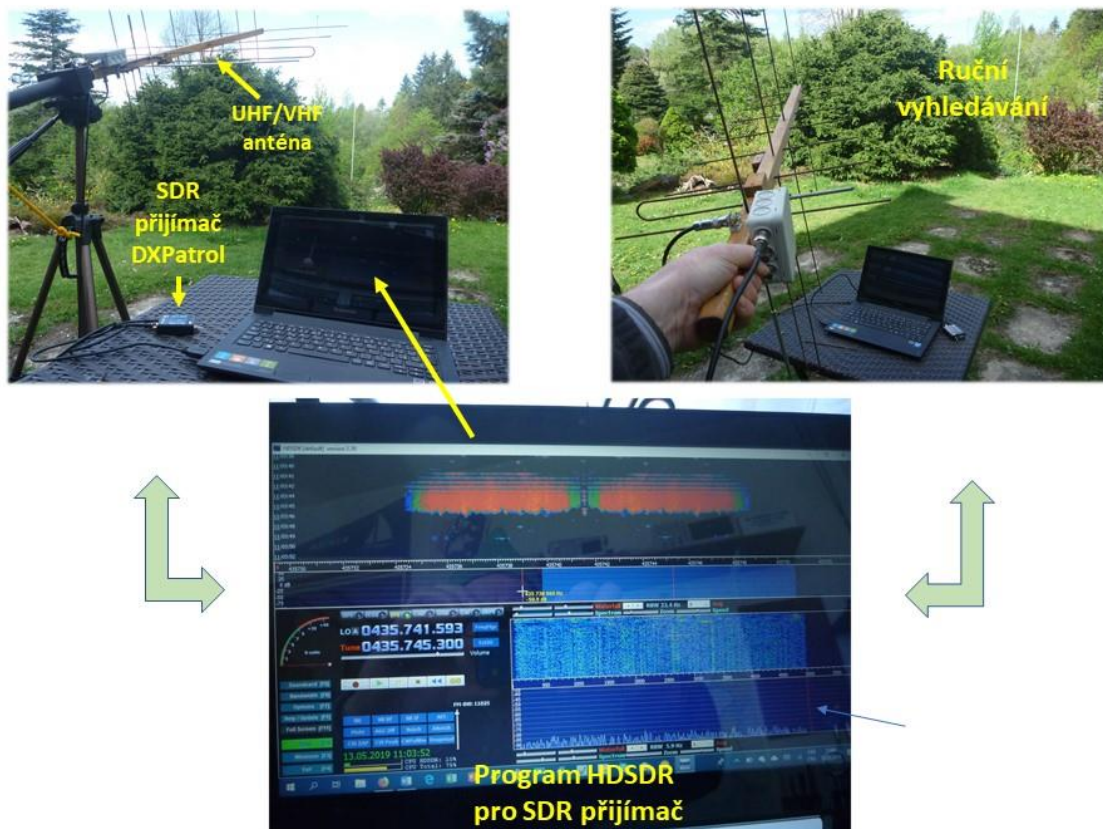
- Využití sítě CVUT-S1 na FEL ČVUT lze předpokládat v následujících oblastech :
- Cílená teoretická a praktická výuka témat spadajících do konstrukce a aplikací technologie malých družic v rámci studijního programu EK (spolupráce mezi katedrami – radioelektronika, mikroelektronika, elektromagnetické pole, řídicí technika, ...) a programu Letecké a kosmické systémy,
- Věda, výzkum a vývoj aplikací v oblasti bezpečnosti a spolehlivosti telekomunikačních sítí pro aplikace a řízení objektů na Zemi a v kosmu
- Vývoj aplikací robotů a umělé inteligence na malých družicích a pozemských stanicích
- Zapojení do mezinárodních projektů univerzitních družic jak v oblasti technologické, tak vědeckých experimentů a aplikovaného výzkumu v rámci projektů ESA – Artes (například One Web – projekt Sunrise), Průmysl 4.0, Horizon 2020, EU operační programy, TAČR, GAČR, státní správa, atd. .
- Využití členství v ITU pro řešení administrativních záležitostí spojených s provozem malých družic a aktivní na práci příslušných studijních skupin ITU -R (Working Party 4A (WP 4A) - Efficient orbit/spectrum utilization for FSS and BSS) a Working Party 4B (WP 4B) - Systems, air interfaces, performance and availability objectives for the fixed-satellite service (FSS), broadcasting- satellite service (BSS) and mobile-satellite service (MSS),

including IP-based applications and satellite news gathering (SNG) a Working Party 4C – Efficient orbit/spectrum utilization for the mobile-satellite service (MSS) and the radiodetermination-satellite service (RDSS).

- Možnost rozšíření výuky o téma správy rádiového spektra, kterou žádná česká univerzita doposud neposkytuje.

Popsaný ideový návrh mise může být i inspirací pro obdobné středoškolské projekty. Minimálně ve směru vybudování pozemní stanice pro teoretickou a praktickou výuku a pro motivaci studentů pro studium technických oborů na univerzitách.

Že malé družice se mohou stát také edukační hrou spočívající v „lovení“ rádiových signálů vysílanými malými družicemi a stanicí ISS, ke které stačí malé mobilní vybavení lze dokumentovat na obr. 50, které používá autor (antény jsou vlastní konstrukce).



Obr. 50 Mobilní pozemní stanice realizovaná autorem pro vyhledávání rádiových signálů z malých družic

Pro realizaci mobilní pozemní stanice bylo použito dvou antén YAGI pro kmitočtové 145 MHz (3 prvky) a 435 MHz (6 prvků) zhotovené z dřevěného hranolu 25 z 25 mm a svářecích drátů o průměru 4 mm, SDR radia DX Patrol a běžného kancelářského notebooku se sledovacím

software Orbitron a G-Predict. Pro dekodování přijímaných audiosignálů lze případně využít softwarů na internetu, které jsou volně dostupné u některých misí malých družic. Například v dokumentu na <https://funcubetest2.files.wordpress.com/2018/12/funcube-dashboard-summary-v1.pdf> jsou uvedeny odkazy pro stažení dekodérů pro malé družice FunCube 1/ AO 73, ESEO, NAYF-1 a JY1Sat.

Je tu i možnost sledovat reálná telemetrická data na těchto družicích i bez výše uvedeného vybavení přímo pomocí webového rozhraní na internetu, které poskytují provozovatelé malých družic. Nebo jen hledání signálů radiomajáků družic pomocí webových SDR přijímačů (například <http://sdr.packetradio.at:8901/> nebo <http://farnham-sdr.com/>). To se ovšem ztratí to napětí (adrenalin), zábava a poznatky s živým rádiovým příjmem při lovení signálů z malých družic a mezinárodní kosmické stanice ISS.

Pro ověření některých aspektů a znalostí získaných v této kapitole je možné využít následujícího testu ([viz příloha č. 2](#)).

3 Vývojové trendy v oblasti malých družic

Malé družice jsou již dnes součástí celého komplexu, který se podílí na všestranném rozvoji společnosti a životních podmínek na Zemi.

Rozvoj moderních technologií, které jsou použitelné pro realizaci vědeckého, technologického a aplikačního payloadu jakož i rozvoj kosmického průmyslu bude v blízké budoucnosti podstatně ovlivněn zaváděním robotizace a aplikací umělé inteligence, potřebami pro vysokorychlostní radiokomunikační a optické sítě a pro infrastrukturu komunikace M2M (stroj – stroj), kam patří zejména internet věcí (IoT).

Již dnes se ukazuje výrazný trend využívání malých družic na LEO oběžných dráhách zejména pro senzorické monitorování stavu atmosféry a statických a dynamických dějů na povrchu Země pro ochranu životního prostředí, prevenci a řešení přírodních katastrof, dopravu, zemědělství, ochranu kritické infrastruktury, pro různé vojenské, bezpečnostní účely a pro telekomunikační služby. To vše i s ohledem na zajištění potřebné úrovně ochrany a bezpečnosti jak vlastní infrastruktury malých družic a jejich konstelací, tak i jejich aplikací a služeb na Zemi i v kosmu.

S tímto rozvojem souvisí i nutnost změn v oblasti legislativy, regulace pro provoz misí malých družic spojených se zajištěním mírového využívání kosmu, bezpečnosti v kosmickém a pozemním segmentu a ochrany kosmu před kosmickým odpadem a pro vytváření svobodného konkurenčního kosmického trhu.

Dalším výrazným trendem, který podstatně umožní rozvoj využívání technologie malých družic bude zvyšování počtu privátních společností, které budou poskytovat finančně dostupné služby pro vynášení a umístování misí malých družic na oběžné dráhy a specializovaných společností pro úklid kosmického smetí.

V následujících kapitolách budou některé základní aspekty trendů v oblasti rozvoje využívání malých družic podrobněji diskutovány.

3.1 Rozvoj standardu Cube Sat a dalších platform malých družic

V obecné rovině lze rozvoj standardu CubeSat a dalších platform malých družic spojit s potřebami jejich aplikací a poskytovaných služeb pro zajištění „trvalého a udržitelného rozvoje“ života na Zemi.

Koncept a definice udržitelného rozvoje je obsažena ve zprávě „Our Common Future“ vydané World Commission on Environment and Development (nazývaný jako Brundtland Report) [20]. Jeho definice se opírá o dva klíčové elementy – pojem “potřeby” (s ohledem na priority potřeb, které je nutné poskytnout nejchudší populaci) a zavedení limitů v rozvoji technologií a sociální služeb společnosti tak, aby bylo možné zajistit naplnění těchto potřeb dnes i v budoucnosti. Jak toto zajistit je obsaženo v přijatém dokumentu Generálního shromáždění OSN – Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development (OSN Agenda 2030)[21].

Směrování rozvoje využívání malých družic a jejich konstelací v kosmu je ve své podstatě obsaženo v následujících cílech příslušných bodů OSN Agendy 2030:

Cíl 1 a 2: Ukončení chudoby a hladu

Snímkování a senzorické monitorování atmosféry a povrchu Země pomocí malých družic a poskytování získaných dat všem subjektům se zaměřením na zemědělství (data pro předpovědi počasí, snímky o stavu a pohybu stád, stavu vodních zdrojů atd.) povede k zajištění dostatečné zemědělské produkce zvláště v rozvojových zemích.

Cíl 3: Dobré zdraví a pohoda

Část populace na Zemi žije v odlehlých místech na souši nebo na ostrovech, kde dostupnost zdravotních služeb a lékařské péče je vzhledem k vzdálenostem nebo i díky nedostatečné telekomunikační infrastruktuře a nízké ekonomické úrovni obtížná. Obvykle to vyžaduje mít k dispozici nějaký osobní dopravní prostředek (automobil, loď), pokud není dostupná veřejná doprava. Rovněž doba dojezdu lékařské pomoci značně zvyšuje riziko, že nebude včas lékařská pomoc poskytnuta. Obdobně tak řešení zdravotní prevence a zajištění zdravotních služeb pro lidi s nějakým hendikepem (fyzickým nebo psychickým).

Jednou z možností, jak se s takovými situacemi vyrovnat dnes nabízí národní nebo mezinárodní systémy eHealth. Ty jsou postavené především na internetových on-line aplikacích pro vzdálené zdravotní a lékařské služby, prevenci, pomoci při náhlých zdravotních komplikacích a pro přivolání pomoci.

Bohužel často v těchto oblastech přístup do internetu je omezený nebo není k dispozici vůbec. Sítě malých družic s velkými konstelacemi (např. OneWeb) jsou jedním z významných způsobů, které mohou tyto situace účinně řešit.

Cíl 4: Kvalita vzdělávání

Obdobně jako v předchozím případě, ne všude má populace žijící v odlehlých oblastech přístup k prezenčnímu vzdělávání. Stále větší úlohu v celém komplexu celoživotního vzdělávání hrají multimediální způsoby vzdáleného vzdělávání – eLearning.

Opět sítě malých družic budou sehrávat stále důležitější roli v řešení dostatečně rychlého a spolehlivého přístupu do internetu.

Cíl 5: Rovnost pohlaví

Otázka rovnosti pohlaví k možnostem zapojení se do vědeckých a technických aktivit ve využívání kosmu je těsně spojena s možností přístupu ke kvalitnímu teoretickému a praktickému vzdělávání a tím i příležitostmi pracovat v kosmické vědě a kosmickém průmyslu. Rozvoj malých družic bude vytvářet větší možnosti na účast většího počtu žen a jejich zapojení do aktivit spojených s vědou a využíváním kosmu.

Cíl 6: Čistota vody

V dnešní době se stále více ukazuje význam přístupu lidské populace k dostatečným zdrojům nejen pitné vody. Čistota zdrojů vody (prameny, řeky, moře a oceány) a její ochrana je zcela zásadní pro zachování života na Zemi.

Proto stále více bude nabývat na významu kontinuální monitorování stavu vod a vyhledávání zdrojů znečištění. S tím jsou spojena i různá preventivní opatření jako včasného varování před nebezpečnými situacemi (povodně, výbuchy sopek, tsunami, ...).

Malé družice a jejich konstelace se senzorickým payloadem budou hrát nezastupitelnou roli v zachování čistoty vody.

Cíl 12: Odpovědnost za produkci a spotřebu

Je zřejmé, že jakákoliv produkce spotřebovává přírodní obnovitelné i neobnovitelné přírodní zdroje. Růst spotřeby je spojen i s nárůstem počtu obyvatelstva Země. Proto je například důležité monitorovat rozsah rybolovu, živočišné a rostlinné zemědělské produkce, pohybu a lovu zvěře atd.

I zde malé družice se senzorickým payloadem zde budou hrát důležitou roli v různých bezpečnostních a ochranných systémech.

Cíl 13: Ochrana klimatu

Ochrana klimatu je důležitým aspektem v ochraně životního prostředí a jeho dopadů na lidskou populaci. Proto je nezbytné monitorovat stav atmosféry a jejích změn. Velkou úlohu zde sehrávají systémy podporující prevenci a řešení přírodních tísňových situací a katastrof.

Malé družice a jejich konstelace budou stále více významným článkem v těchto systémech. To s ohledem na vlastní senzorické monitorování, tak i jako krizová telekomunikační infrastruktura v případě přírodních katastrof, kdy dojde ke omezení funkčnosti nebo zničení pozemské infrastruktury (pevné a mobilní sítě) v dané územní lokalitě.

Cíl 14: Život pod vodou

Moře a oceány hrají důležitou roli ve výživě všeho živého na Zemi. Proto je důležitá jejich ochrana jak z pohledu spotřebovávání jejich produkce, tak i čistoty. K tomuto cíli přispívá i kontrola pohybu a aktivit lodí a ponorek na hladině i pod hladinou. K tomuto účelu se dnes využívají identifikační systémy lodí AIS (Automatic Identification System) a LRIT (Long Range Identification of Traffic). Oba systémy plní i úlohu směrem k zajištění bezpečnosti námořní plavby.

V současné době je v provozu systém exactView využívající LEO oběžné dráhy ve výšce kolem 650 km s konstelací mikrodružic (do 100 kg) a nanodružic (do 10 kg), který umožňuje zpracování signálů jak na lodi tak ve vzdáleném centru.

Malé družice budou v budoucnu budou hrát významnou roli nejen v systému AIS, ale jako doplněk systému LRIT a dalšího námořního bezpečnostního a tísňového systému GMDSS (Global Maritime Safety and Distress System).

Cíl 15: Život a povrch Země

Pro životní podmínky na Zemi hrají významnou roli lesní porosty (zejména pralesy). Jejich ochrana souvisí i s ochranou klimatu (stavu a čistoty vod, tvorby počasí) a ochrana před zmenšováním zalesněných ploch. To jak z pohledu velikosti těžby, tak z podmínek umožňující nežádoucí množení různých škůdců.

Malé družice budou stále více využívány v senzorických systémech, které budou součástí aktivit ochrany lesních porostů na Zemi.

Cíl 16: Mír, spravedlnost a instituce

Tento cíl programu udržitelného rozvoje předpokládá, že předchozích cílů lze dosáhnout především zachováním míru (například zamezení přenesení pozemských vojenských konfliktů

do kosmu, zamezení vzniku kosmických armád, ...), vytvářením spravedlivých administrativních a legislativních podmínek v nekorupčním prostředí pro všechny zájemce o mírové využívání kosmu prostřednictvím posílení národních a mezinárodních institucí.

To ve svém důsledku znamená, že technologie malých družic a přístup do kosmu bude umožněn všem zájemcům na tomto segmentu kosmického trhu a nebude omezován přístup k vědecko-výzkumným aktivitám a ke vzdělání v této oblasti ve smyslu výše formulovaných cílů udržitelného rozvoje života na Zemi. Rovněž tak, že ochrana kosmu před kosmickým odpadem a bezpečnost bude věcí všech, kdo v kosmu budou mít svoje aktivity.

Trendy rozvoje CubeSat

Z výše uvedeného obecného pohledu a jednotlivých souvislostí lze dovodit zejména následující praktické aspekty trendů rozvoje CubeSat a dalších platform s ohledem na zaměření tohoto materiálu.

Díky rozvoji zejména technologií a dostupnosti výroby 3D tisku a univerzálních programovatelných elektronických komponent, nových generací SDR radiokomunikačních technik a výkonných anténních systémů a zdrojů elektrické energie povede i k většímu zapojení a rozvoji kosmického průmyslu i za účasti malých a středních podniků, různých subjektů typu start-up nebo spin-off.

Je zřejmé, že bude růst trh poskytování kompletních otestovaných stavebnic malých družic, hardware a software komponent systémů malých družic a knihoven pro automatický vývoj letového software.

Rovněž se očekává rozvoj v oblasti propulsních motorů pro potřeby umístování a stabilizace CubeSat na oběžné dráze, jakož i pro potřeby řízeného zániku pro zabránění nežádoucího kosmického odpadu. Vývoj směřuje od motorů používajících studené nebo horké plyny k elektrickým propulsním plazmovým motorům a ve vhodných podmínkách ve využití pomocí slunečních plachet.

Jasným trendem je zejména směřování k misím s konstelacemi s velkým počtem malých družic Cubesat (nanodružice, pikodružice a femtodružice) pro telekomunikace (např. v infrastruktuře mobilních sítí 5G, přístupu do internetu, ...), družicového senzoringu. Dále pak nárůst malých misí pro potřeby vědy, ověřování průmyslových technologií mimo povrch Země a pro výuku na základních, středních školách a univerzitách.

Trend rozvoje v oblasti malých družic zejména v oblasti telekomunikací a monitorování Země je pro představu patrný i z odhadu vývoje počtu misí uveřejněný v [22] v roce 2015 do roku 2030 na obr. 51.

51. Odhad vývoje počtu vypouštěných malých družic do roku 2030

Výrazný nárůst v roce 2019 je důsledkem předpokladu vypouštění malých družic mise OneWeb (Space X). Bez ohledu na skutečná čísla je patrné, že nárůst je významný. Lze z toho i dovodit, že současně bude významně narůstat i množství kosmického smetí.

V příštích letech lze očekávat výrazný nástup různých druhů misí založených na standardu CubeSat, rozvoj tohoto standardu v návaznosti na příchod dalších subjektů jak z oblasti výroby komponent pro stavbu a vypouštění malých družic, tak pro jejich vypouštění do kosmu.

Ani u nás nestojíme stranou rozvoje vlastního standardu CubeSat a spoluúčasti privátních společností. Dokladem toho je projekt technologické testovací mise družice LUCKY-7 (<http://www.lucky7satellite.org/>). Na jeho realizaci se podílí elektrotechnická fakulta ČVUT v Praze a česká firma SkyFox Labs s.r.o.

Ve všech uvedených oblastech se dá očekávat výraznější trend směrem ke standardizaci, které je předpokladem pro další snižování potřebných finančních prostředků rozpočtu misí malých družic. To nepochybně umožní zapojení se do různých kosmických aktivit i u nás na úrovni minimálně středních technických škol.

3.2 Trendy v oblasti regulace a legislativy pro malé družice

S rozvojem malých družic těsně souvisí i otázky trendů jejich regulace v oblasti správy rádiového spektra a mezinárodní a národní legislativy vztahující se k provozu, bezpečnosti a ochraně kosmu před kosmický odpadem.

Je třeba vzít v úvahu, že malé družice a vše co s nimi souvisí se dotýkají i politických otázek a zájmů mnoha států. Ať ji se jedná o zajištění svobodného využívání kosmu a přístupu na kosmický trh, umožnění rozvoje nového kosmického průmyslu a pro účely vědecký a technologických experimentů a pro výuku, tak i v ochraně vlastnictví a investic vložených do jednotlivých projektů misí malých družic. To spolu s hledáním účinných způsobů pro potlačení rizik spojených s doprovázející růstem objemu kosmického smetí.

K tomu přistupuje nutnost zajištění bezpečné a spolehlivé rádiové komunikace jak v pozemním, tak kosmickém segmentu. To včetně technického a legislativního zajištění ochrany všech provozovaných a budoucích radiokomunikačních služeb před nežádoucími rádiovými interferencemi.

Je zřejmé, že výše uvedené okolnosti se nutně promítají do potřeby příslušných změn v současné regulaci jak ve správě rádiového spektra, tak mezinárodního práva spojeného s využíváním kosmu.

O řadě těchto aspektů bylo diskutováno v předešlých kapitolách. V této kapitole bude věnována pozornost tomu, co lze a bude nezbytné řešit v nejbližší budoucnosti tak, aby potenciál, které technologie malých družic byl využit co nejefektivněji a pokud možno i v souladu s cíli udržitelného rozvoje života na Zemi.

Podrobnější pojednání o těchto záležitost přesahuje rámec tohoto materiálu z důvodu značné komplikovanosti. Dále řada věcí z pohledu budoucna je otevřena a probíhají k ní široké diskuse nejen odborného charakteru, ale i různých politických a hospodářských zájmů zejména světových velmocích spojených jak z vlastní bezpečností, tak pro posílení konkurenceschopnosti na světových trzích spojených nejen z kosmickým průmyslem a využíváním kosmu.

Nicméně bude vhodné z pohledu školních a universitních projektům se věnovat některým těmto záležitostem v souvislosti s dnes známým a očekávaným vývojem alespoň v základní rovině.

Je totiž nezbytné, aby při plánů misí byly dále popisované záležitosti brány v úvahu. Jejich zanedbání může ve svém důsledku vést nejen k neúspěchu vlastního projektu mise, ale i k

ohrožení jiných misí. S tím související i možnosti nehod, ohrožení jiných družicových služeb, které může ve svém důsledku vést k nutnosti nemalých finančních kompenzací a náhrad.

V oblasti legislativní je nezbytné, aby stávající mezinárodní úmluvy a konvence na úrovni OSN dotýkajících se registrace umělých objektů vysílaných do kosmu a konvence o odpovědnosti za škody způsobené těmito umělými objekty byly aktualizovány směrem k zahrnutí malých družic.

Vývoj a politika směrem k mírovému využívání kosmu je agendou konferencí UNISPACE (Conference on the Exploration and Peaceful Uses of Outer Space) konaných ve Vídni. Výsledky jednání se bezpochyby budou promítat do směřování a rozvoje misí malých družic.

Zásadní roli tu bude nadále sehrávat i COPUOS a její orgán OOSA, který je odpovědný za provádění registrace podle konvence o registraci umělých objektů vysílaných do kosmu. Problémem je, že trend v počtu vysílaných malých družic má stoupající tendenci. Vzhledem k tomu, že řada misí má krátké trvání, tak vlastní doba administrace registrace je často delší než tato mise. Je zřejmé, že dosud uplatňované postupy směrem k velkým družicím již nelze plně aplikovat na malé družice. Druhou věcí je, že v zájmu států musí být dobrovolné dodržování registračních povinností a jejich účinná kontrola obsažená v národní legislativě.

Dalším aspektem je nutnost úpravy procedur týkající se způsobu potlačování kosmického odpadu ve vazbě na konvenci o odpovědnosti za způsobenou škodu jak v kosmu, tak na Zemi. Zde se nabízí několik způsobu, jak toho dosáhnout.

Jednou z nich je metoda konsolidace. Ta spočívá ve vytvoření mnohaúčelové platformy pro aktivní odstraňování kosmického smetí, kde budou zahrnuty malé družice a jejich komponenty. COPUOS zvažuje pro školní experimenty použití letových experimentů z kosmické stanice ISS pod kontrolou kosmonautů s využitím její stávající platformy NanoRacks.

Další metodou je pasivní úklidový mechanismus. Ten využívá principu sluneční plachetnice, která po skončení mise nasměruje malou družici do nižších vrstev atmosféry, kde bezzbytku shoří.

Třetí způsobem je aktivní úklidový mechanismus s využitím speciálních družic pro zachytávání malých družic do sítí, jejich sběr a následné nasměrování do nižších vrstev atmosféry, kde shoří. Zvažují se i metody ničení pomocí laserových paprsků (například švýcarský projekt CleanSpaceOne) [1].

Jistým problémem bude v budoucnu úklid misí s velkými konstelacemi obdobnými jako OneWeb. Rovněž v případě, kdy to malé družice nebudou typu CubeSat (nano, piko, femto), ale malé telekomunikační družice s hmotností 200 kg až 250 kg.

Bezpečné odstraňování kosmického odpadu působené malými družicemi a jeho legislativní zakotvení v kosmickém právu, je zcela zásadní pro další rozvoj a rovněž pro dlouhodobé udržitelné využívání kosmu. Proto je toto téma v současné době předmětem řady studií prováděných v NASA, ESA a na univerzitách ve světě.

Druhou oblastí, která významně ovlivní další rozvoj technologie a využívání malých družic je problematika vývoje správy a regulace rádiového spektra. Toto téma bylo předmětem kapitoly 1.7.

Z pohledu trendů dalšího rozvoje dotýkajícího se malých družic bude i v budoucnu nadále hrát zásadní úlohu ITU ve všech jejích sektorech (radiokomunikační, standardizační a rozvojový) a Radiokomunikační řád ITU. V návaznosti na ně pak regulace uplatňované pro mise malých družic na regionální a národní úrovni. Rozhodující je však globální úroveň, protože dráhy malých družic mají rovněž globální charakter.

Z hlediska správy rádiové spektra bude potřebné najít a přidělit dostatečná kmitočtová pásma tak, aby byly umožněny bezpečné a nerušené rádiové komunikace v pozemním i kosmickém segmentu jak pro konstelace malých družic, tak dalších orbitálních a geostacionárních družic.

Zároveň také, aby nebyly rádiovými interferencemi při komunikaci malých družic rušeny všechny druhy služeb, které mají zejména přednostní kmitočtová přidělení v pásmech, které budou v budoucnu v Radiokomunikačním řádu přidělena malým družicím spolu s regulatorními požadavky na jejich koordinaci a notifikaci.

Je zřejmé, že současný stav, kdy jsou v misích malých družic převážně využívána VHF a UHF kmitočtová pásma amatérské služby je neudržitelný a omezující zejména pro rozvoj velkých konstelací malých družic. Jaké další rádiové kmitočty a za jakých technických (zjištění kompatibility s dalšími rádiovými systémy) a regulatorních podmínek (licenční nebo bezlicenční kmitočtová pásma, notifikace misí malých družic, ...) bude předmětem Světových radiokomunikačních konferencí (WRC) v letech 2019 a dalších (podrobněji viz kap. 1.7).

Směr dalšího vývoje ve správě rádiového spektra bude do značné míry určen výsledky a závěry WRC 19 v agendě 1.7 (Nano a piko satelity).

Najít další vhodné kmitočtové úseky rádiového spektra rozhodně nebude jednoduchou záležitostí. Proto jsou tyto záležitosti mnoha studií kompatibility a tématem studijní otázek řešených v příslušných studijních skupinách radiokomunikačního sektoru ITU-R. V současné době probíhá přechod na takzvanou 4. generaci správy rádiového spektra. Jejím cílem je zvýšit efektivní využívání vzácného a obnovitelného přírodního zdroje na základě hledání částečně nebo vůbec nevyužívaných rádiových kmitočtů, použitím úsporných digitálních

radiokomunikačních technologií a přerozdělení přidělení rádiového spektra stávajícím radiokomunikačním službám.

Významným aspektem, který má vliv na hledání potřebného rozsahu kmitočtů rádiového spektra pro malé družice, je trend k nepřidělení samostatných kmitočtových pásem v Radiokomunikačním řádu pro rádiovou komunikaci M2M. Tedy zejména do oblasti jeho aplikací v podobě internetu věcí (IoT) a využívání umělé inteligence.

Vzhledem k uvedeným skutečnostem se již v současné době se hledají další způsoby komunikace pro sítě nejen malých družic. Nadějnou se jeví cesta komunikace s použitím optického spektra a laserových paprsků. To nejen pro komunikace typu družice – družice, ale i pro komunikaci mezi družicí a pozemní stanicí.

Optická komunikace umožní větší rychlosti a objem přenášených dat řádově v Gbit/sec a minimalizuje možnosti nežádoucích interferencí. To bude mít velký význam pro řadu aplikací využívajících technologie malých družic, jakož i pro vlastní systémy malé družice a řízení provozu v kosmickém i pozemním segmentu.

Jak již bylo výše uvedeno rozvoj regulace malých družic musí být reflektován v národní legislativě. To bude zcela zásadní i pro plánování a realizaci školních a univerzitních projektů misí malých družic v ČR. Tato problematika musí být řešena především v zákoně č. 127/2005 Sb., o elektronických komunikacích a v návazných právních předpisech. Dále pak v souladu s aktualizací Národního kosmického plánu (po roce 2019), Inovační strategií České republiky pro roky 2019 – 2030 a dalších programů spojených se zaváděním záměru Průmysl 4.0.

3.3 Trendy v oblasti regulace a legislativy pro malé družice

S rozvojem malých družic těsně souvisí i otázky trendů jejich regulace v oblasti správy rádiového spektra a mezinárodní a národní legislativy vztahující se k provozu, bezpečnosti a ochraně kosmu před kosmický odpadem.

Je třeba vzít v úvahu, že malé družice a vše co s nimi souvisí se dotýkají i politických otázek a zájmů mnoha států. Ať ji se jedná o zajištění svobodného využívání kosmu a přístupu na kosmický trh, umožnění rozvoje nového kosmického průmyslu a pro účely vědecký a technologických experimentů a pro výuku, tak i v ochraně vlastnictví a investic vložených do jednotlivých projektů misí malých družic. To spolu s hledáním účinných způsobů pro potlačení rizik spojených s doprovázející růstem objemu kosmického smetí.

K tomu přistupuje nutnost zajištění bezpečné a spolehlivé rádiové komunikace jak v pozemním, tak kosmickém segmentu. To včetně technického a legislativního zajištění ochrany všech provozovaných a budoucích radiokomunikačních služeb před nežádoucími rádiovými interferencemi.

Je zřejmé, že výše uvedené okolnosti se nutně promítají do potřeby příslušných změn v současné regulaci jak ve správě rádiového spektra, tak mezinárodního práva spojeného s využíváním kosmu.

O řadě těchto aspektů bylo diskutováno v předešlých kapitolách. V této kapitole bude věnována pozornost tomu, co lze a bude nezbytné řešit v nejbližší budoucnosti tak, aby potenciál, které technologie malých družic byl využit co nejefektivněji a pokud možno i v souladu s cíli udržitelného rozvoje života na Zemi.

Podrobnější pojednání o těchto záležitost přesahuje rámec tohoto materiálu z důvodu značné komplikovanosti. Dále řada věcí z pohledu budoucna je otevřena a probíhají k ní široké diskuse nejen odborného charakteru, ale i různých politických a hospodářských zájmů zejména světových velmocích spojených jak z vlastní bezpečností, tak pro posílení konkurenceschopnosti na světových trzích spojených nejen z kosmickým průmyslem a využíváním kosmu.

Nicméně bude vhodné z pohledu školních a universitních projektům se věnovat některým těmto záležitostem v souvislosti s dnes známým a očekávaným vývojem alespoň v základní rovině.

Je totiž nezbytné, aby při plánů misí byly dále popisované záležitosti brány v úvahu. Jejich zanedbání může ve svém důsledku vést nejen k neúspěchu vlastního projektu mise, ale i k

ohrožení jiných misí. S tím související i možnosti nehod, ohrožení jiných družicových služeb, které může ve svém důsledku vést k nutnosti nemalých finančních kompenzací a náhrad.

V oblasti legislativní je nezbytné, aby stávající mezinárodní úmluvy a konvence na úrovni OSN dotýkajících se registrace umělých objektů vysílaných do kosmu a konvence o odpovědnosti za škody způsobené těmito umělými objekty byly aktualizovány směrem k zahrnutí malých družic.

Vývoj a politika směrem k mírovému využívání kosmu je agendou konferencí UNISPACE (Conference on the Exploration and Peaceful Uses of Outer Space) konaných ve Vídni. Výsledky jednání se bezpochyby budou promítat do směřování a rozvoje misí malých družic.

Zásadní roli tu bude nadále sehrávat i COPUOS a její orgán OOSA, který je odpovědný za provádění registrace podle konvence o registraci umělých objektů vysílaných do kosmu. Problémem je, že trend v počtu vysílaných malých družic má stoupající tendenci. Vzhledem k tomu, že řada misí má krátké trvání, tak vlastní doba administrace registrace je často delší než tato mise. Je zřejmé, že dosud uplatňované postupy směrem k velkým družicím již nelze plně aplikovat na malé družice. Druhou věcí je, že v zájmu států musí být dobrovolné dodržování registračních povinností a jejich účinná kontrola obsažená v národní legislativě.

Dalším aspektem je nutnost úpravy procedur týkající se způsobu potlačování kosmického odpadu ve vazbě na konvenci o odpovědnosti za způsobenou škodu jak v kosmu, tak na Zemi. Zde se nabízí několik způsobu, jak toho dosáhnout.

Jednou z nich je metoda konsolidace. Ta spočívá ve vytvoření mnohaúčelové platformy pro aktivní odstraňování kosmického smetí, kde budou zahrnuty malé družice a jejich komponenty. COPUOS zvažuje pro školní experimenty použití letových experimentů z kosmické stanice ISS pod kontrolou kosmonautů s využitím její stávající platformy NanoRacks.

Další metodou je pasivní úklidový mechanismus. Ten využívá principu sluneční plachetnice, která po skončení mise nasměruje malou družici do nižších vrstev atmosféry, kde bezzbytku shoří.

Třetí způsobem je aktivní úklidový mechanismus s využitím speciálních družic pro zachytávání malých družic do sítí, jejich sběr a následné nasměrování do nižších vrstev atmosféry, kde shoří. Zvažují se i metody ničení pomocí laserových paprsků (například švýcarský projekt CleanSpaceOne) [1].

Jistým problémem bude v budoucnu úklid misí s velkými konstelacemi obdobnými jako OneWeb. Rovněž v případě, kdy to malé družice nebudou typu CubeSat (nano, piko, femto), ale malé telekomunikační družice s hmotností 200 kg až 250 kg.

Bezpečné odstraňování kosmického odpadu působené malými družicemi a jeho legislativní zakotvení v kosmickém právu, je zcela zásadní pro další rozvoj a rovněž pro dlouhodobé udržitelné využívání kosmu. Proto je toto téma v současné době předmětem řady studií prováděných v NASA, ESA a na univerzitách ve světě.

Druhou oblastí, která významně ovlivní další rozvoj technologie a využívání malých družic je problematika vývoje správy a regulace rádiového spektra. Toto téma bylo předmětem kapitoly 1.7.

Z pohledu trendů dalšího rozvoje dotýkajícího se malých družic bude i v budoucnu nadále hrát zásadní úlohu ITU ve všech jejích sektorech (radiokomunikační, standardizační a rozvojový) a Radiokomunikační řád ITU. V návaznosti na ně pak regulace uplatňované pro mise malých družic na regionální a národní úrovni. Rozhodující je však globální úroveň, protože dráhy malých družic mají rovněž globální charakter.

Z hlediska správy rádiové spektra bude potřebné najít a přidělit dostatečná kmitočtová pásma tak, aby byly umožněny bezpečné a nerušené rádiové komunikace v pozemním i kosmickém segmentu jak pro konstelace malých družic, tak dalších orbitálních a geostacionárních družic.

Zároveň také, aby nebyly rádiovými interferencemi při komunikaci malých družic rušeny všechny druhy služeb, které mají zejména přednostní kmitočtová přidělení v pásmech, které budou v budoucnu v Radiokomunikačním řádu přidělena malým družicím spolu s regulatorními požadavky na jejich koordinaci a notifikaci.

Je zřejmé, že současný stav, kdy jsou v misích malých družic převážně využívána VHF a UHF kmitočtová pásma amatérské služby je neudržitelný a omezující zejména pro rozvoj velkých konstelací malých družic. Jaké další rádiové kmitočty a za jakých technických (zjištění kompatibility s dalšími rádiovými systémy) a regulatorních podmínek (licenční nebo bezlicenční kmitočtová pásma, notifikace misí malých družic, ...) bude předmětem Světových radiokomunikačních konferencí (WRC) v letech 2019 a dalších (podrobněji viz kap. 1.7).

Směr dalšího vývoje ve správě rádiového spektra bude do značné míry určen výsledky a závěry WRC 19 v agendě 1.7 (Nano a piko satelity).

Najít další vhodné kmitočtové úseky rádiového spektra rozhodně nebude jednoduchou záležitostí. Proto jsou tyto záležitosti mnoha studií kompatibility a tématem studijní otázek řešených v příslušných studijních skupinách radiokomunikačního sektoru ITU-R. V současné době probíhá přechod na takzvanou 4. generaci správy rádiového spektra. Jejím cílem je zvýšit efektivní využívání vzácného a obnovitelného přírodního zdroje na základě hledání částečně nebo vůbec nevyužívaných rádiových kmitočtů, použitím úsporných digitálních

radiokomunikačních technologií a přerozdělení přidělení rádiového spektra stávajícím radiokomunikačním službám.

Významným aspektem, který má vliv na hledání potřebného rozsahu kmitočtů rádiového spektra pro malé družice, je trend k nepřidělení samostatných kmitočtových pásem v Radiokomunikačním řádu pro rádiovou komunikaci M2M. Tedy zejména do oblasti jeho aplikací v podobě internetu věcí (IoT) a využívání umělé inteligence.

Vzhledem k uvedeným skutečnostem se již v současné době se hledají další způsoby komunikace pro sítě nejen malých družic. Nadějnou se jeví cesta komunikace s použitím optického spektra a laserových paprsků. To nejen pro komunikace typu družice – družice, ale i pro komunikaci mezi družicí a pozemní stanicí.

Optická komunikace umožní větší rychlosti a objem přenášených dat řádově v Gbit/sec a minimalizuje možnosti nežádoucích interferencí. To bude mít velký význam pro řadu aplikací využívajících technologie malých družic, jakož i pro vlastní systémy malé družice a řízení provozu v kosmickém i pozemním segmentu.

Jak již bylo výše uvedeno rozvoj regulace malých družic musí být reflektován v národní legislativě. To bude zcela zásadní i pro plánování a realizaci školních a univerzitních projektů misí malých družic v ČR. Tato problematika musí být řešena především v zákoně č. 127/2005 Sb., o elektronických komunikacích a v návazných právních předpisech. Dále pak v souladu s aktualizací Národního kosmického plánu (po roce 2019), Inovační strategií České republiky pro roky 2019 – 2030 a dalších programů spojených se zaváděním záměru Průmysl 4.0.

3.4 Možnosti uplatnění malých družic pro potřeby telekomunikací a dopravy

Malé družice a jejich konstelace budou nacházet svoje použití v oblasti telekomunikací a dopravy jak pro potřeby budování infrastruktury, tak aplikací pro poskytované služby na tomto rostoucím segmentu kosmického trhu. O řadě aplikací bylo již v předchozích kapitolách napsáno.

V této kapitole bude věnována pozornost spíše obecným trendům spojeným se zaváděním sítí malých družic na LEO oběžných dráhách v oblasti telekomunikací a dopravy. To i s ohledem na možnosti jejich uplatnění na telekomunikačním trhu.

Nárůst využití technologií malých družic standardu CubeSat na LEO oběžných dráhách lze očekávat v těchto oblastech:

- Přístup do internetu ve vzdálených lokalitách pro potřeby státní správy, různých lokálních řídicích a informačních systémů, výuku a zábavy v souladu s programovými cíli udržitelného rozvoje (viz kap. 3.1).
- Mobilní síť 5G – vysokorychlostní mobilní přístup do internetu ve vzdálených lokalitách a posílení kapacity sítě při mimořádných událostech na vybraných lokalitách.
- Specializované sítě pro potřeby komunikací M2M (internet věcí, ...)
- Zálohování a zajištění komunikace v kritické infrastruktuře státu.
- Komunikace při řešení přírodních katastrof a rozsáhlých hromadných nehod – rychlá realizace komunikační infrastruktury pro záchranné aplikace v postižené oblasti a posílení kapacity při odstraňování jejich následků
- Infrastruktura pro aplikace v různých bezpečnostních a záchranných systémech v dopravě.

Z hlediska telekomunikační infrastruktury bude pokračovat rozvoj stávajících konstelací jako je dnešní OneWeb a dalších obdobných projektů směřovaných do oblasti přístupu do internetu. Příkladem může být i konkurenční projekt Starlink (investor Elon Musk) pro vysokorychlostní připojení k internetu, který využívá CubeSat nanodružic o hmotnosti kolem 1,33 kg., který má být plně funkční v roce 2021.

Nepochybně kromě rozvoje konstelací, který je spojen s nárůstem počtu řádově na stovky a jednotky tisíc malých družic uvedených projektů, budou na trh přicházet další projekty telekomunikačních sítí. To lze dovodit z dostupných informací na internetu, z příspěvků na konferencích a v odborných časopisech. Rozvoj tohoto segmentu telekomunikací postavený na konstelacemi malých družic CubeSat je i obsahem různých inovačních programů předních kosmických agentur jako je NASA nebo ESA.

Vývoj bude rovněž směřovat ve vytváření specializovaných sítí s konstelacemi malých družic CubeSat zejména pro potřeby internetu věcí a různých aplikací využívající umělé inteligence. Příkladem může být záměr společnosti amarické společnosti Smart Technologies (<https://www.thespaceresource.com>). Záměrem je vybudování specializované sítě pro potřeby aplikací internetu věcí. Jde o konstelaci 150 CubeSat družic o rozměrech 10 x 10 x 2,8 cm s hmotností do 1 kg (CubeSat 0,25 U - pikodružice) pojmenovaných jako „kosmická včela“ (Space Bee).

Otázka dalšího vývoje je ovšem spojena obecně i s vývojem na telekomunikačním trhu. To jak z pohledu finančních investičních zdrojů, Tak i výše očekávaných zisků z provozu telekomunikačních sítí postavených na malých družicích a ochoty uživatelů za takto poskytované služby platit. To přesto, že lze díky rozvoji technologií pro stavbu a provoz malých družic, pokračující standardizaci v konstrukci, vypouštění a jejich úklidu, spolu s růstem konkurence pro vypouštění malých družic lze předpokládat reálné možnosti pro snižování vlastních nákladů na vybudování a provoz.

Zásadním problémem bude řešení otázek bezpečné rádiové a optické komunikace v kosmickém a pozemním segmentu. To z pohledu jak potlačení rizik nehod malých družic, tak zabránění teroristickým útokům, nepřátelskému převzetí nebo nekalé konkurence na kosmickém trhu.

Je třeba vzít v úvahu, že i případě využívání malých družic na LEO oběžných dráhách jde téměř vždy o globální byznys. Na segmentu telekomunikačního trhu je značná konkurence zejména od velkých družic na geostacionárních dráhách. Sítě malých družic ze své podstaty nebudou výrazně konkurovat v oblasti současného standardního šíření programů rozhlasového a televizního vysílání. Avšak tržní potenciál malých družic je v případě vysokorychlostního připojení do internetu a přístupu jeho službám a aplikacím.

Zda se naplní očekávání na tomto trhu, je také závislé na dostatečném objemu rádiového spektra v závislosti na vývoji nových radiokomunikačních technologií. Rovněž, zda se podaří pomocí optické komunikace překonat očekávaný nedostatek rádiového spektra.

Bude tedy otázkou, zda se poskytovatelům sítí malých družic na LEO oběžných dráhách podaří najít úspěšné obchodní modely v konkurenci nejen geostacionárního kosmického, ale i pozemského telekomunikačního trhu.

Další oblastí, kde lze očekávat zvýšený podíl využívání technologií malých družic na LEO oběžných dráhách, je poskytování infrastruktury pro systémy řízení, bezpečnosti a záchranu v pozemské (železniční a silniční), letecké a námořní dopravě.

Ve své podstatě půjde o specializované sítě malých družic pro potřeby různých řídicích a informačních systémů. Použití technologie malých družic vytváří dobré předpoklady pro dostatečně rychlé zprovoznění takových systémů, spolu s možností flexibilních a investičně přijatelných změn jak v době vývoje, tak vlastního provozu.

Například v námořní dopravě to je systém řízení a bezpečnosti námořní dopravy e-NAV formulovaný v Mezinárodní námořní organizaci IMO (International Maritime Organization). V jeho rámci se jedná o rozšíření pozemního námořního identifikačního systému lodí AIS o jeho kosmickou komponentu S-AIS a družicové komponenty pro datový komunikační systém specifických zpráv (ASM) a systém pro výměnu dat VDES. [14].

Již dnes je zřejmé, že sítě malých družic ve všech druzích dopravy, zejména však v letecké a námořní dopravě, budou zaujímat stále výraznější postavení. Zvláště pak ještě ve spojení s rozvojem družicových navigačních systémů na MEO oběžných dráhách (Galileo, GPS, Glonass, Beidou, ...) a mobilních sítí (Iridium, Orbcomm) a na GEO dráhách (Inmarsat, Thuraya, Global Star).

3.5 Využití malých družic pro potřeby monitorování Země

V současné době je oblast malých družic stále více využívána nejen pro sledování stavu různých vrstev atmosféry, ale pro různé druhy dálkového monitorování zemského povrchu a pohybu objektů po něm. O některých projektech bylo psáno již v kapitole 1.5 i v souvislosti takzvaným paradigmatem pozorování Země označovaným jako „Earth Observation 2.0“ [1].

Jedná se především o technologie (kamery, senzory, radary) sloužící pro dálkové snímkování v různých částech a druzích spektra a zpracování získaných dat v podobě vizuální (fotografie nebo videa) nebo pro další analytická vyhodnocení (radary).

S rozvojem snímacích a radarových senzorů se stále větším radiometrickým a prostorovým (počet bodů na jednotku plochy) rozlišením. To v oblastech infračerveného spektra, přes optické viditelné až po radarové snímky, které jsou pořízeny v mikrovlnné části elektromagnetického spektra.

Vývoj jednoznačně směřuje k vytváření sdílených konstelací malých družic s hmotnostmi do 200 kg a k bezplatnému využívání získaných dat. To zvláště u vládami podporovanými projekty pro snímkování se středním rozlišením zhruba do jednoho metru. Příkladem může být postupně se rozvíjející program Copernicus Earth Observation realizovaný Evropskou komisí a ESA s malými družicemi Sentinel 1 (radar).

Získané informace globálního nebo lokálního charakteru jsou využitelné v řadě aplikací pro vládní a komerční účely. Jako například pro různé potřeby v ochraně a bezpečnosti státu, jeho kritické infrastruktury, záchranných systémů, ochrany obyvatelstva, klimatu, v meteorologii a hydrologii, pro prevenci a řešení přírodních katastrof, v zemědělství a dopravě atd. Takové aplikace budou stále více využívat platformu internetu věcí (IoT) a umělé inteligence a cloudových (vzdálená úložiště dat) řešení.

Je to oblast, kde se mohou vedle konstelací družic realizovaných prostřednictvím různých vládních, komerčních a univerzitních konsorcií uplatnit i malé školní projekty nesoucí monitorovací a senzorické experimenty na jednotlivých malých družicích CubeSat. Ty mohou být využity jak pro výuku, tak i mají potenciál komerčního uplatnění. Takové mise mohou posloužit i pro získávání finančních prostředků pro další mise.

S předpokládaným rozvojem hotových stavebnic CubeSat v kategorii nano a piko a při stále širší nabídce finančně přijatelných možnostech pro vypouštění na LEO oběžnou dráhu v rámci sdílených misí různých konsorcií, je reálné zvažovat a plánovat mise i v našich podmínkách středního školství.

Pro ověření některých aspektů a znalostí získaných v této kapitole je možné využít následujícího testu (viz [Příloha č. 3.xlsx](#)).

4 Příprava odborníků pro vývoj a provoz malých družic

Využívání technologie malých družic na LEO oběžných dráhách a jejich další rozvoj je spjatý s dostatečným počtem odborně vzdělaných lidí v řadě odborností technického i humanitního směru, které mají vztah k problematice spojené s kosmickým průmyslem a využíváním kosmu.

V úvodu si lze položit zásadní otázku, zda je třeba zavádět specializované studium pro vývoj a aplikace technologií malých družic nebo bude dostatečné to řešit formou nadstavbového studia nebo kursů doplňující studium programů orientovaných na kosmický průmysl a využívání kosmu na úrovni univerzitního bakalářského a magisterského studia.

Lze očekávat, že jako efektivní cesta bude forma specializovaných kursů (přednášek, cvičení, týmových projektů misí, start-upů, ...) v rámci řádného univerzitního bakalářského, magisterského a doktorandského studia.

Další otázkou je, jak a na jaké úrovni vzdělávání začít a jak motivovat zájemce o tuto oblast. Z dosavadních zkušeností ve světě se ukazuje, že je možné motivovat a podporovat zájem o tato studia již na úrovni základních škol a někde dokonce mateřských škol.

Ve světě, a zvláště v zemích s vybudovaným kosmickým průmyslem a dlouholetými aktivitami v kosmu (USA, UK, Francie Rusko, Indie, Japonsko, ...), lze nalézt řadu úspěšných programů pro zajištění vzdělávání odborníků v této oblasti. V převážné většině se jedná o univerzitní studia různých odborností ve vztahu ke kosmu. To jak v technických oborech pro potřeby kosmických agentur, vědecko-výzkumných institucí a kosmického průmyslu, tak s orientací na mezinárodní majetková, průmyslová a bezpečnostní legislativu. To spolu s přípravou expertů i pro působení v mezinárodních organizacích jako COPUOS nebo ITU.

Nejen ve vyspělých zemích je dnes snaha získávat zájemce o taková studia již na úrovni základních škol. Což dokladuje řada projektů malých misí i rozvojových zemích Afriky a Asie. O jednom takovém projektu je krátce pojednáno v kap. ... a další lze nalézt v [1].

Pro inspiraci k formulování strategie vzdělávání technických odborníků pro oblast malých družic je možné využít i zkušeností popsané v případové studii „Building Engineers: A 15-Year Case Study in CubeSat Education“ [23].

Ve studii jsou shrnuty zkušenosti z více jak 15 let pořádaného kursu na téma NanoSatellite Design na University of Illinois v USA. Kurs je o délce jednoho nebo dvou semestrů. Je pojatý jako mnohaoborový s délkou dvouhodinových přednášek za týden. Výuka je zaměřena na základní témata spojená se základními technologiemi a procesy pro návrh, stavbu a testování malých družic CubeSat. Studenti pracují na vlastních projektech, které jsou prezentovány a diskutovány na speciální vyhrazené přednášce pořádané každý týden.

Kromě teoretických přednášek jsou studenti zapojeni i do týmových projektů plánovaných misí university. V popisovaném případě se jednalo o mise CubeSail (CubeSat U1,5) a LAICE, které byly připravovány na vypuštění v roce 2017 (ve skutečnosti vypuštěné 16. prosince 2018 z Nového Zélandu).

Znalosti studentů byly periodicky ověřovány během jednotlivých fází řešení jejich projektů od návrhu až po realizaci. Součástí projektů bylo zpracování dokumentace projektu (průběžné zprávy, provozní manuály, testovací protokoly, ...).

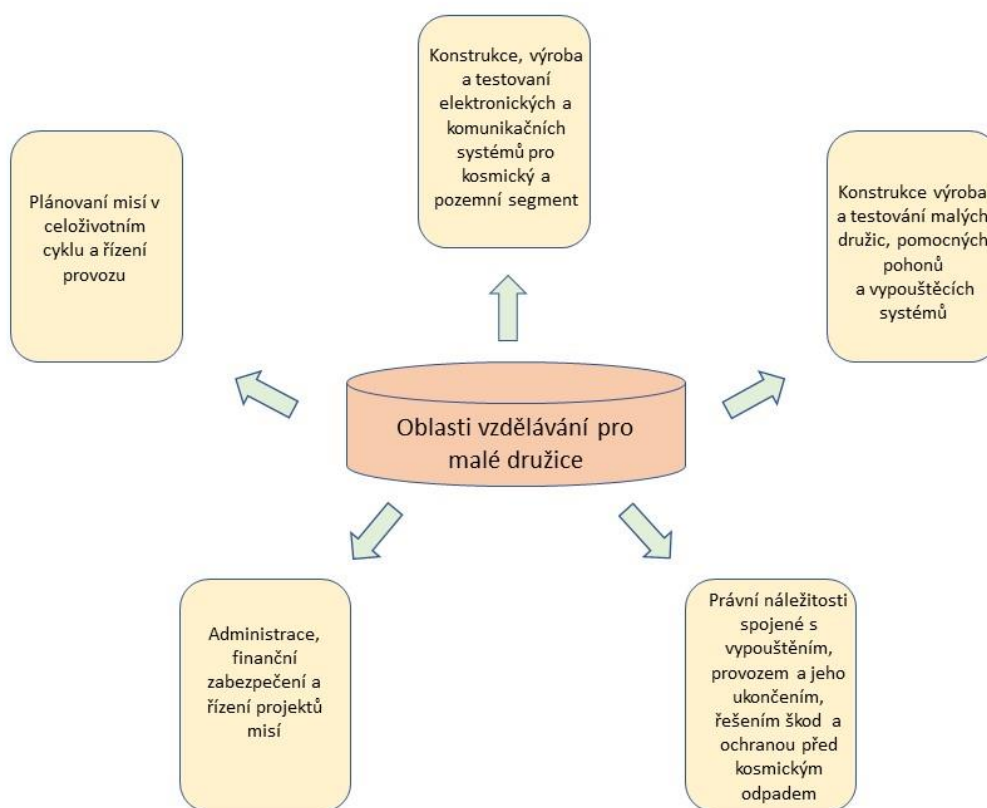
V tomto kursu jsou využívány a rozvíjeny získané znalosti a praktické zkušenosti s příslušných předmětů, které jsou obsaženy v celkových osnovách university a zpětně jsou využívány pro inovaci jejich osnov výuky.

Universita připravuje výuku ve dvou nových pokračovacích kursech zaměřených na výzkumný payload.

V dalším se zaměříme na podmínky, které reflektují vzdělávací procesy v České republice a mohou být využitelné pro formulování strategie vzdělávání na úrovni základních a středních škol se zaměřením na využívání technologie malých družic v našich podmínkách.

Strategie vzdělávání odborníků na všech vzdělávacích stupních musí být obsažena primárně ve vládou schváleném Národním kosmickém programu.

Obory dotýkající se tematicky vzdělávání odborníků pro využívání technologie malých družic si lze ve shrnující podobě ukázat na obr. 52.



Obr. 52 Obory vztahující se ke vzdělávání v oblasti využívání technologie malých družic

Ze samé podstaty věci a budoucnosti směřované k využívání kosmu nejen malými družicemi je zřejmé, že příprava odborníků pro využívání kosmu a vlastní výuku učitelů by měla začínat na základních školách. Zde lze předpokládat nejvhodnější prostředí pro základní motivaci zájmu o kosmos. Tento zájem bude možné cíleně rozvíjet na středoškolském a následně na vysokoškolském stupni vzdělávání.

Příkladem je využití projektu mise CubeSat nanodružice VZLUSAT-1 pro výuku na elektrotechnické fakultě VUT v Plzni [18], [19] a v roce 2022 pak projektu malé družice Planetum-1 (<https://www.planetum.cz/druzice-planetum1/>).

Proto bude zcela zásadním aspektem, aby problematika kosmu zahrnující i malé družice byla zařazena do rámcových osnov výuky na základních a středních a vyšších odborných školách.

Jednotlivá témata dotýkajících se kosmu musí být vzájemně a vhodně provázána s osnovami výuky těch předmětů.

Efektivní cestou může být zařazení vhodně formulovaných úloh při výuce matematiky, fyziky, chemie, přírodovědy a v předmětech z oboru elektrotechniky, elektroniky, kybernetiky, strojírenství, ochraně klimatu používáním materie kosmu a technologie malých družic.

Téma kosmu díky své atraktivitě a jisté dávce tajemnosti může také na druhé straně napomoci i většímu zájmu o uvedené předměty.

Pro motivaci o technická studia s orientací na problematikou využívání kosmu a potažmo i na malé družice CubeSat a výuku už na úrovni základních škol lze využít i existujících mimoškolních technických kroužků na základních školách nebo zájmových uskupení na úrovni středních škol.

Dále pak iniciativ jako je například Centrum studentských aktivit České kosmické kanceláře (<https://www.3pol.cz/cz/rubriky/studenti/2281-centrum-studentskych-aktivit-ceske-kosmicke-kancelare>) a národních nebo mezinárodních soutěží pořádaných řadou universit nebo kosmických agentur (NASA, ESA, ...) a různé programy a experimenty využívající mezinárodní kosmickou stanici ISS a z ní poskytovaných volně dostupných dat.

Jednou z mnoha možností zapojení škol může být je vzdělávací projekt NSA - Sally Ride EarthKAM (Earth Knowledge Acquired by Middle school students) NASA. Jeho cílem je zprostředkování využívání snímkování Země z ISS pro žáky a studenty různých stupňů škol, učitele a i dalším zájemcům z veřejného sektoru. Praktické využití tohoto projektu na české základní a mateřské škole Bílá v Praze 6 ve spolupráci s MFF Karlovy university je popsán v článku EarthKAM – využití mezinárodního projektu NASA ve škole [24].

Dnešní naši žáci a studenti mají základní využitelné znalosti a dovednosti ve využívání různých počítačových a komunikačních technologií, včetně různých her spojených s letectvím, robotikou a kosmem.

Již na úrovni žáků základních škol existuje velký zájem o aplikace směřem k robotice a umělé inteligenci s využitím stavebnic programovatelných mikro-kontrolérů typu Arduino, Rasbery apod.

K tomu přistupuje stále více finančně dostupné technologie jako jsou například 3D tiskárny. Lze pořídit i ruční a základnové rádiové stanice pro příjem signálů z družic (radioskenery – fy. Kenwood, ICOM, Yesu, ...) nebo přijímače SDR v podobě USB nebo externích adaptérů s programy na PC (HSDR, Airspy, ...).

Pomocí internetových nebo mobilních aplikací (IOS, Android) lze využívat různých sledovacích programů (Orbitron, G-Predict, ...), včetně dekodérů pro telemetrii pro jednotlivé mise malých družic.

At' se jedná o různé školní, univerzitní nebo amatérské projekty využitelné i pro výuku jako FunCube-1 a 2 (Amsat-UK, ARRL USA) (<https://funcube.org.uk/education-outreach/>) nebo radioamatérské družice programu OSCAR, PCSAT není pro jejich využití třeba si pořizovat vlastní zařízení pro příjem. Dostačuje běžně dostupné PC a připojení do internetu, což již na všech stupních našich škol je zajištěno.

Tyto projekty jsou doprovázeny studijními osnovami a studijními materiály v anglickém jazyce. Jsou vhodné i jako inspirace při tvorbě vlastní osnovy a přímé využití při výuce. Může to posloužit i jako studijní materiál v rámci výuky anglického jazyka.

K výuce navrhování vlastních misí malých družic Cube Sat lze využít i již popsaného bezplatného programového balíku NOS3 od NASA.

Z výše uvedeno vyplývá, že zásadním problémem je chybějící systematické a koncepční zařazení témat spojených s využíváním kosmu do osnov výuky na základním a středoškolském stupni a vzdělávání a ochota učitelů se v tomto tématu vzdělávat a pak ho vyučovat.

Téma vzdělávání směřované na přípravu odborníků pro využívání technologie malých družic je nejen u nás stále otevřenou problematikou, která bude stále více nabývat na důležitosti. V zemích s rozvinutou kosmickou infrastrukturou se takové celoživotní vzdělávání bere velice vážně. Důvodem je, že využívání technologie malých družic nejen na LEO oběžných dráhách pro různé veřejné i neveřejné aplikace nabývá na stále větším významu a je vysoce perspektivním segmentem kosmického trhu.

Proto i u nás by mělo vzdělávání v oblasti využívání kosmu (nejen z pohledu využívání malých družic) pojato koncepčně v celém vzdělávacím systému. Je to naprosto nezbytné jak pro udržení konkurenceschopnosti hospodářství (např. pro program Průmysl 4.0), tak pro rozvoj společnosti jako celku. V budoucnu už bude obtížné najít nějaké ostré hranice ve vzdělání mezi tím, co je určeno pro využití pozemské a co pro kosmos.

Na trhu lidských zdrojů budou stále více potřeba odborně vzdělaní lidé, kteří budou mít dostatečné penzum znalostí v technických, manažerských a právních oborech související s problematikou udržitelného rozvoje života na Zemi a v kosmu.

Pro takové odborníky se jedná v podstatě o celoživotní kariéru. A to i přesto, že mnohé činnosti v celém řetězci životního cyklů misí nejen malých družic a vlastní výuky převezmou roboti a další aplikace využívající umělé inteligence.

5 Závěr

V předchozích kapitolách byly postupně popsány a diskutovány základní aspekty spojené využíváním kosmu pomocí malých družic zejména standardu CubeSat na LEO oběžných dráhách. Téma malých družic nebylo doposud z kontextu celé široké problematiky a ve vztahu k výuce na všech stupních našeho vzdělávacího systému publikačně zpracováno.

V zahraničí je k dispozici řada tematicky zaměřených publikací, článků ve specializovaných odborných časopisech a sbornících konferencí, ve zprávách konsorcií jednotlivých projektů popisujících jednotlivé oblasti dané problematiky. Na internetu lze nalézt webové stránky mezinárodních organizací, kosmických agentur, projektů misí, výrobců a poskytovatelů vynášení a umístování malých družic standardu Cubesat na LEO oběžných dráhách a mnoho instruktážních fotografií videí na sociálních sítích platformě YouTube.

Hlavním cílem předkládaného materiálu bylo pokusit se o komplexní přehledový pohled na technická, právní a aplikační témata a jejich vzájemnou provázanost nejen pro vlastní technologie, výrobu, stavbu malých družic a různé vědecké a technologické experimenty a aplikace, ale i na provázanost s kosmickou legislativou a na dopady a synergii ve využívání kosmu jako celku ve směru bezpečného, mírového a udržitelného rozvoje života společnosti na Zemi i v kosmu.

To vše především se zaměřením zpracování podkladových materiálů pro učitele a studenty na středoškolském vzdělávacím stupni. Jak se však ukazuje, je pro efektivitu výuky a podpoření motivace studentů začít se vzděláváním spojeným nejen s malými družicemi už na základním stupni. Tam je v podstatě hlavní šance, jak nejúčinněji motivovat žáky a následně i studenty o témata spojená s kosmem. Na středoškolském stupni pak nasměrovat jejich zájem o získávání hlubších znalostí v jednotlivých technických i humanitních oblastech studia spojených s kosmem.

Nepochybně významně se bude podílet na podpoře zájmu o kosmos různé plánované mise k planetám jako je Mars nebo Měsíc spojené i s různými náborovými soutěžemi. Dále pak možnosti nabízející mise konstelací malých družic na LEO oběžných drahách jako například OneWeb pro vysokorychlostní přístup do internetu a mobilních sítí 5G a aplikace spojené s internetem věcí, monitorováním Země využívající robotů a aplikací umělé inteligence.

K tomu přistupuje i rozvoj technologií pro stavbu malých družic jako je 3D tisk, finančně dostupné stavebnice CubeSat, zařízení pro rádiovou komunikaci založených SDR technologiích a možnost využívání komponent z běžné produkce, která není primárně určena a testována pro použití v kosmu.

To vše v souhrnu představuje infrastrukturu výukových pomůcek, která je využitelná na všech vzdělávacích stupních pro potřeby teoretického a praktického vzdělávání.

Mohou se pro mnohé nakonec i stát jen koníčkem třeba v radioamatérském sportu. Rovněž tak v různých vlastních experimentech simulujících mise CubeSat pomocí dnes tolik populárních dronů.

I s přihlédnutím k výše uvedenému se výklad omezil na ty nejpodstatnější poznatky a praktické aplikace ukázané na konkrétních příkladech misí CubeSat se zaměřením na školní a univerzitní projekty.

Dále byl při zpracování jednotlivých témat kladen důraz na získání orientace studentů a učitelů v jednotlivých oblastech spojených s malými družicemi bez nutnosti mít na počátku hlubší teoretické znalosti z matematiky, fyziky a praktické dovednosti směrem ke kosmu, či znalosti a zkušenosti například s družicovou rádiovou komunikací.

Většina kapitol tak představuje pouze základní pohled do dané problematiky a upozorňuje na vzájemné souvislosti s cílem získat potřebnou orientaci v probíraných tématech. V souhrnu to má pak charakter první důležitého kroku pro další hlubší studium jak žáka, studenta a učitele. Zároveň to může být využito jako podkladový zdroj pro učitele při tvorbě jejich vlastních osnov a metod výkladu jednotlivých tematických okruhů.

Pro tyto potřeby lze v tomto materiálu najít velké množství publikačních a multimediálních materiálů spolu s internetovými odkazy a s dalšími publikačními referencemi. Obrázky a videa je možné přímo využít i při tvorbě vlastních prezentací, což podstatně ulehčí učiteli jeho přípravu na výuku.

Nezanedbatelnou možností je, že během vyučovací hodiny je možné přímo a živě prezentovat i reálnou komunikaci s malými družicemi jen s využitím PC připojeného do internetu nebo mobilního telefonu vybaveným bezplatným aplikačním softwarem.

V rámci praktických cvičení je možné připravit i různé hry jako třeba „lovení signálů družic“ nebo sledovat rádiovou komunikaci s amatérskými družicemi nebo s mezinárodní kosmickou stanicí ISS s využitím internetových SDR rádiových přijímačů na webových stránkách.

Rovněž lze tento materiál využít při zpracování návrhu školních misí malých družic, při formování týmů pro takové školní projekty, případně jako inspirace pro zakládání studentských start-up podniků na středoškolské úrovni pro řešení vybraných částí takových projektů.

Téma malých družic a s tím spojenou výuka nelze striktně vymezovat hranicemi odvozenými vzdělávacími stupni našeho školství. Dynamika nástupu a produkce moderních technologií založených na standardizaci, robotizaci a umělé inteligenci ve spojení s jejich aplikacemi a

službami na Zemi i v kosmu bude vyžadovat i změny ve metodách a obsahu výuky našeho školství.

To musí být i v souladu s vládními strategickými cíli pro využívání kosmu formulované především Národní kosmickém plánu a v dalších návazných národních strategických dokumentech, s využíváním možnostmi daných naším členstvím v ESA a ve vazbě na záměry a cíle kosmických programů formulovaných v EU.

V závěru lze zdůraznit, že malé družice CubeSat (nano, piko a femto) jednotlivé nebo v různých konstelacích na LEO oběžných dráhách, a vše co je s nimi spojeno ve vědě, výzkumu, průmyslu, poskytování služeb a vzdělávání, dávají budoucím odborníkům a vědcům velké příležitosti pro celoživotní kariéru v řadě oborů spojených s využíváním kosmu.

Představuje to i možnost kariéry v mezinárodních organizacích jako například COPUOS nebo ITU, v kosmických agenturách a ve státní správě.

Autor doufá, že tento materiál a jeho zpracování přispěje všem jeho čtenářům ke vzbuzení zájmu o oblast využívání kosmu pomocí nejen technologie malých družic a podpoří aktivity učitelů jak ve výuce, úprav obsahu a modernizace metodiky vzdělávání, tak i v praxi.

□□□

6 Zkratky a akronymy

ADR (Active debris removal) - aktivní odstranění kosmického odpadu (smetí) - činnosti vedoucí k řízenému odstranění vzniklého odpadu v kosmu (úlomky z umělých kosmických objektů, nefunkční družice nebo vypouštěcího zařízení, atd.) odpadu. Na rozdíl od pasivních nekontrolovaných metod využívajících gravitace, odporu v atmosféře nebo účinků kosmického počasí. U malých družic a úlomků většinou dojde k odstranění shořením v horních vrstvách atmosféry.

AMSAT – registrovaná značka radioamatérské družicové korporace.

AM – amplitudová modulace – nosná vlna vysílaného signálu mění amplitudu v závislosti na amplitudě vstupního modulačního signálu.

AOS (aquisition of signal) – čas, kdy pozemní stanice může zahájit příjem signálů z družice s elevací 0° nad zemským horizontem.

ARISS (Amateur Radio on the International Space Station) – provozování dvou rádiových transpondérů (vysílací a přijímací radiostanice) na Mezinárodní kosmické stanici využívaných pro školní výukové účely, různé komunikační experimenty a radioamatérskou komunikaci (hlasovou, digitální, pomalou televizi SSTV, družicová komponenta pozemského sledovacího systém APRS – Automatic Packet Reporting System)

Apogee (apogeeum) – nejvzdálenější bod na oběžné dráze mezi geometrickým středem (geocentrem) Země a družicí.

Ascending node (vzestupný uzel) – bod na oběžné dráze družice (nebo zemské dráze), kde dochází k jejímu přechodu rovníku z jižní zemské polokoule (hemisféry) na severní zemskou polokouli (hemisféru).

Azimut - úhel v horizontální zemské rovině měřený ve směru pohybu hodinových ručiček od severního zemského pólu.

B2B – Business to business communication - označení pro obchodní vztahy mezi obchodními společnostmi, pro jejich potřeby, které se netýkají dodávek produktů a služeb konečnému spotřebiteli.

Beacon (maják) – většina družic má vysílač, kde pomocí CW modulace nosné vlny vysílá na určitém kmitočtu telemetrická data nebo speciální identifikační signály.

COSPAR (Committee on Space Research) - Výbor pro výzkum vesmíru - mezinárodní vědecké sdružení ustavené v roce 1958 Mezinárodní radou pro vědu pro záležitosti týkající se výměny informací vztahujících se k využívání kosmu.

CCSDS (Consultative Committee on Space Data Systems) - Poradní výbor pro kosmické datové systémy - jeho posláním je koordinace sběru, uchovávání a využívání dat z kosmických aktivit

Cubesat (CubeSat) - všeobecně uznávaný standard konstrukce malé družice - umělý kosmický objekt ve tvaru krychle, jehož základní jednotka označovaná jako CubeSat 1 U je o rozměru je 10 cm x 10 cm x 10 cm a má hmotnost 1 kg pojmenovaná jako pikodružice. Její rozšiřování se děje násobky až po 12 U. V závislosti na celkové hmotnosti se pak rozlišují minidružice (do 1000 kg), mikrodružice (do 100 kg), nanodružice (do 10 kg) nebo femtodružice (do 0,1 kg).

CW (Continuous Wave) – metoda modulace přerušováním nosné vlny pro vysílání Morseova kódu

Data Relay Store-and-Forward Service - služba, kterou může omezený počet satelitů na nízké oběžné dráze Země poskytovat prostřednictvím stahování a distribucí uložených dat na určené místo.

Descending node (sestupný uzel) - bod na oběžné dráze družice (nebo zemské dráze), kde dochází k jejímu přechodu rovníku ze severní zemské polokoule (hemisféry) na jižní zemskou polokouli (hemisféru).

The Disaster Charter – Mezinárodní listina o katastrofách - listina (charta) o mezinárodní spolupráci pro dosažení koordinovaného využití umělých kosmických objektů v případě přírodní nebo technologické katastrofy. Dojednána v roce 2000 jako součást dohody UNISPACE III. Na základě této charty jsou bezplatně poskytována aktuální data z dálkového průzkumu (monitorování) Země. Například z uskupení GEO (Group on Earth Observations) nebo GMES (Global Monitoring for Environment and Security) pro monitorování životního prostředí a bezpečnosti.

Downlink – směr vysílání rádiového signálu z družice na pozemní stanici.

Dual-use satellites/payloads – dvojí využití družic a jejich užitečného zatížení (payloadu) - využití družice a její užitečného zatížení (nákladu, payloadu) současně nebo alternativně pro civilní (zejména komerční) a vojenské účely.

Electron Launch Vehicle (elektronové vypouštěcí vozidlo) - nové vypouštěcí vozidlo vyvinuté společností Rocket Labs. Nového Zélandu a Kalifornie a společností NewSpace, který

se snaží rozvíjet nízko nákladový dopravní prostředky pro dopravu a umístování malých družic na nízkých oběžných dráhách.

Elevace – úhel na lokální horizontální zemskou rovinou.

EMI (Electromagnetic Interference) – zkratka pro elektromagnetickou interferenci při využívání rádiového spektra zařízeními pro vysílání a příjem rádiové komunikace.

Equal non-discriminatory sharing/uses of outer space - rovné nediskriminační sdílení / využití kosmu - právní termín zavedený ve kosmickém právu ve Smlouvě o kosmu (Outer Space Treaty) a dohodě o využívání Měsíce (Moon Treaty). Vyjadřuje požadavek na rovnou účast států na sdílení a využití vesmíru bez ohledu na úroveň jejich ekonomického a vědeckého rozvoje.

Equitable sharing/uses of outer space – spravedlivé sdílení / využití kosmu - na rozdíl od „rovného sdílení“ se jedná o výhody, které vznikají z využívání kosmu a vyjadřuje vyvážené sdílení na základě vložených investic a výsledků produkovaných jednotlivými státy.

Epoch time (čas epochy) – referenční čas ve kterém se mění parametry popisující pohyb družice.

ESA (European Space Agency) – Evropská kosmická agentura - kosmická agentura pro společné vědecké a rozvojové kosmické programy Evropské unie. Česká republika je jejím členem od roku 2009 a podílí se na financování a využívání povinných a nepovinných programů formou spolupráce v rámci účasti jednotlivých projektových a programových konsorcií a na řízení ESA.

EEO (Extremely Eccentric Earth Orbit) nebo **HEO** (Highly Eccentric Orbit) extrémně nebo vysoce excentrická oběžná dráha Země - oběžná dráha s vysokou excentricitou, někdy nazývaná podle družice Molniya, která byla prvně využita pro telekomunikační účely.

EUTELSAT (European Telecommunications Satellite Organization) – Evropská telekomunikační družicová organizace - vládní organizace pro družicové a rozhlasové vysílání. Česká republika je jejím členem, K vysílacím službám využívá zejména geostacionární konstelace sítí družicového operátora SES – Astra.

FSK (Frequency shift keying) – druh digitální modulace vysílaného signálu, u kterého se přenáší digitální informace pomocí diskretních změn kmitočtu nosné vlny. Podle druhu a způsobu klíčování se rozlišují BFSK - binární, AFSK - audio, MSK – s minimálním klíčovým posunem a její varianta GMSK pro mobilní GSM).

Footprint (stopa) – kontura na zemském povrchu, která ohraničuje plochu, kde je možný příjem signálu z družice.

GEO (Geostacionary Earth Orbit) / **GSO** (Geosynchronous Earth Orbit) – geostacionární dráha - rovníková dráha s výškou nad 35 800 km. Z pohledu pozorovatele na Zemi se jeví bez pohybu. GSO je teoretické vyjádření pro oběžnou dráhu přesně v rovině zemského rovníku.

Geocenter (geocentrum) – geometrický střed Země.

GALILEO – evropský družicový navigační systém.

GLONASS – ruský družicový navigační systém.

GPS (Global Positioning System) – americký družicový navigační systém.

GNSS (Global Navigation Satellite Systems) – obecný termín používaný pro označení globálního družicového navigačního systému.

Ground station (pozemní stanice) – radiokomunikační stanice na zemském povrchu, která zajišťuje vysílání rádiových signálů na družici a příjem rádiových signálů z družice.

INMARSAT (International Maritime Satellite Organization) – významný družicový operátor poskytující telekomunikační služby pro mobilní družicové komunikace a globální nebo lokální bezpečnostní a záchranné systémy letecké (GADSS - Global Aeronautical Distress and Safety System, Global Flight Tracking) a námořní dopravy (GMDSS – Global Maritime Distress and Safety System).

IAASS (International Association for the Advancement of Space Safety) - nezisková organizace se statusem pozorovatele v COPUOS pro mezinárodní rozvoj v oblasti bezpečnosti.

IAU (International Astronautical Union) – Mezinárodní astronautická unie, která pořádá astronautické kongresy s tříletou periodou konání v různých zemích světa.

Inclination (inklinace) – úhel mezi rovinou oběžné dráhy družice a rovinou zemského rovníku.

ITU (International Telecommunication Union) – Mezinárodní telekomunikační unie. Má sídlo v Ženěvě a jejím generálním tajemníkem je p. Houlin Zhao (ČLR). Organizace sdružuje 193 států členských států OSN. Ve třech sektorech se zabývá správou rádiového spektra (ITU-R) , standardizací v telekomunikacích (ITU-T) a rozvoji telekomunikací a informačních a komunikačních technologií ve světě (ITU-D).

Iridium – globální mobilní radiokomunikační systém využívající konstelace malých družic na nízkých polárních oběžných dráhách.

Launching authority – subjekt vydávající povolení pro vypouštění umělých objektů do kosmu. Je těsně svázán s pojmem Launching State (vypouštěcí stát) ve spojení s povinností registrace těchto objektů u OOSA (Office of Outer Space Affairs) působící v rámci COPUOS.

Liability Convention (Convention on International Liability for Damage Caused by space Objects – Úmluva o mezinárodní odpovědnosti za škodu působené kosmickými objekty - úmluva v rámci OSN a COPUOS vstoupila v platnost v roce 1972. Pokrývá odpovědnost za problémy, které vznikají z kosmických aktivit. Je to smlouva o oběti, jak stanoví absolutní odpovědnost za škody způsobené na povrchu Země a odpovědnosti za vady škody způsobené v kosmu.

LOS (Loss of signal) (ztráta signálu) – je čas, kdy daná pozemní stanice ztratí příjem signálu z družice při elevaci 0°.

LTSOSA (Long Term Sustainability of Outer Space Activities) – pracovní skupina v rámci COPUOS pro záležitosti dlouhodobého udržitelného rozvoje kosmických aktivit.

LEO (Low Earth orbit) – pojem používaný pro nízkou oběžnou dráhu kolem Země ve výškách od 300 m do 1500 m. Většina LEO drah je polární (přelétává nad zemskými póly) a pohyb na nich využívá synchronizaci pomocí Slunce.

MEO (Medium Earth Orbit) – střední oběžná dráha Země ve výškách zhruba od 2 000 km do 35 000 km.

NASA (The National Aeronautical and Space Administration) – jedna nejvýznamnějších vládních kosmických agentur světa. NASA je nezávislá organizace federální vlády Spojených států, která je zodpovědná za civilní kosmický program, výzkum kosmického letectví a kosmu.

Node (nód) – bod, kde družicová trajektorie promítnutá na zemský povrch protíná zemský rovník.

OneWeb – významný projekt využívající technologie malých družic pro vysokorychlostní přístup do internetu. Projekt iniciovaný vizionářem E. Muskem, spolufinancovaný R. Bransonem, ve spolupráci s Googlem a Facebookem. Cílem je postupně prostřednictvím vypuštěných nosnými raketami ruské agentury Roskosmos dosáhnout v roce 2021 konstelace 800 malých obíhajících ve výšce 1200 km a vyrobených společností Astrium Airbus DS.

OOSA (Office of Outer Space Affairs) – součást COPUOS pro podporu jejích právních a správních orgánů, vědeckých a technických podvýborů a dalších pracovních skupin. Mimo jiné provádí i registrace vypouštěných umělých objektů do kosmu. Ustavena v roce 1962 a má sídlo ve Vídni.

OSCAR (Orbital Satellite Carrying Amateur Radio) – sdružení subjektů v nebo mimo rámec organizace AMSAT, které se zabývá stavbou a vypouštěním těchto družic jména s číselným rozlišením na různých oběžných dráhách nesoucí rádiová zařízení (transpondéry) umožňující rádiovou analogovou a digitální komunikaci amatérské služby.

OST (The Outer Space Treaty) - klíčová smlouva z roku 1967 pro svobodné a mírové využívání kosmu formálně známá pod názvem „Treaty on Principles Governing the Activities of States in the Exploration and Use of Outer Space, including the Moon and Other Celestial Bodies“ - Smlouva o zásadách, jimiž se řídí činnost států při průzkumu a využívání vesmíru, včetně Měsíce a jiných nebeských těles. Smlouvu ratifikovalo 104 států včetně České republiky.

Outer space (kosmos nebo vesmír) - obecně používaný termín, ale ne vždy přijímaný, pro prostor pro výšky větší jak 100 km na zemském povrchem (tzv. Von Karman line). Někdy se používá hodnoty o výšce 160 km (horní hranice takzvané protozóny).

Perigee (perigeum) – bod na oběžné dráze družice nejbližší od geocentra Země.

Polar, Sun-synchronous orbits (polární a sluncem synchronizované oběžné dráhy) - jsou vedeny těsně nad oběma póly Země a využívány pro družicové dálkové monitorování (senzorické sledování) zemského povrchu a stavu atmosféry a oceánů. Doba oběhu činí 1/365 dne a tak jsou družice a senzory udržovány v relativně stálé pozici vůči Slunci během celého roku. Tím jsou i zajištěny podobné světelné podmínky pro družicové senzory.

Protozóna – oblast, kde družice již nemůže udržovat oběžnou dráhu, horní hranicí je 160 km a dolní 21 km (horní hranice komerčního vzdušného prostoru).

Radio frequency (RF) – rádiový kmitočet využívaný pro rádiovou komunikaci v rozsahu pásma 9 kHz až 3000 GHz, jeho využívání je dáno vyhrazením (alokací) kmitočtových pásem rádiového spektra různým radiokomunikačním službám uvedených v Radiokomunikačním řádu ITU.

Registration Convention (Convention on Registration of Objects Launched into Outer Space) - Úmluva o zápisu objektů vysílaných do kosmu (1974) – ukládá povinnost vypouštěcím státům toto oznámit OOSA.

SDG (Sustainable Development Goals of the United Nations for 2030) – Cíle udržitelného rozvoje OSN do roku 2030 – dokument schválený Generálním shromážděním Organizace spojených národů (OSN) obsahující 17 globálních cílů a 169 specifických úkolů pro zlepšení v oblastech, jako je zemědělství, životní prostředí, hospodářského růstu a zaměstnanosti, zdraví a vzdělávání atd.

Sidereal day (siderický den) – doba, které trvá Zemi než se otočí o 360°. Siderický den trvá 1436,07 minut.

SSB (Single Side Band) – vysílání s jedním postranním pásmem (s potlačenou nosnou vlnou) rozlišuje USB (horní postranní pásmo) nebo LSB (dolní postranní pásmo).

Suborbital spaceflight (suborbitální kosmický let) - trajektorie letu objektu protíná atmosféru nebo povrch gravitačního bodu z kterého bylo vypuštěno tak, že zatímco kosmická loď dosáhne kosmu, nedokončí se jeden oblet Země.

Subsatellite point – bod na zemském povrchu, který je přímo pod družicí

Transponder – širokopásmový lineární převaděč - opakovač (vysílač a přijímač) umístěný na družici pracující s různými modulacemi nosné (AM, FM, SSB, CW, FSK,...) a to beze změny nebo se změnou kmitočtu nosné vlny přijímaného signálu při vysílání.

TT&C (Telemetry, tracking, and control) – tři základní prvky v provozu družic nebo kosmických lodí na oběžné dráze. Telemetrie obsahuje veškerá data z funkce z družic nebo kosmických lodí. Tracking představuje sledování parametrů těchto objektů na oběžné dráze jako je například okamžitá poloha a dráha pohybu na oběžné dráze. Pomocí povelů v rámci funkce ovládání (control, command) jsou na objektech vykonávány požadované činnosti pro zabezpečení jejich provozu.

UHF (Ultra high frequency) – ultra vysoké kmitočtové pásmo – označování kmitočtového pásma v rozsahu 300 MHz – 3000 MHz (délka vlny od 1 m do 10 cm).

UNCOPUOS (United Nations Committee on the Peaceful Uses of Outer Space), zkráceně COPUOS – orgán ustanovený v roce 1959 Generálním shromážděním Organizace spojených národů (OSN) pro záležitosti mírového využívání kosmu.

UNISPACE (U. N. Conferences on the Exploration and Peaceful Uses of Outer Space) – konference pořádané OSN ve Vídni, které poskytují platformu pro globální dialog o mírovém využívání kosmu a spolupráci mezi státy a mezinárodními organizacemi.

UNCOPUOS Space Debris Mitigation Guidelines - soubor nezávazných předpisů a doporučení schválených UNCOPUOS v letech 2009 až 2010 řešících problematiku ochranu a odstraňování kosmického odpadu.

UNCOSA (U. N. Coordination of Outer Space Activities) – program OSN pro koordinaci kosmických aktivit.

UNOOSA (U. N. Office for Outer Space Affairs), zkráceně OOSA – součást sekretariátu OSN a UNCOPUOS se sídlem ve Vídni. Vykonává správu registrace umělých objektů vypouštěných do kosmu.

Uplink – směr vysílání rádiového signálu z pozemní stanice na družici.

VHF (Very high frequency) – velmi vysoké kmitočtové pásmo – označování kmitočtového pásma v rozsahu 30 MHz až 300 MHz (délka vlny od 1 m do 10 m).

WRC (World Radiocommunication Conferences) – Světová radiokomunikační konference - je pořádaná radiokomunikačním sektorem ITU-R s periodou 3 – 4 let za účelem rozvoje správy rádiového spektra. Jejím výsledkem je aktualizace Radiokomunikačního řádu, schválení doporučení, studijních zpráv a formulace studijních otázek pro další období.