

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Marcel Grün; Pavel Koubský

Radarová astronomie

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 15 (1970), No. 3-4, 138--152

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/139141>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1970

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

RADAROVÁ ASTRONOMIE

MARCEL GRÜN, PAVEL KOUBSKÝ, Praha

Radarová astronomie je metoda, která studuje kosmická tělesa radarem (= Radio Detection and Ranging). Má, podobně jako kosmická astronomie [1] tu velkou výhodu, že dovoluje řídit a aktivně měnit řadu prvků celého měřicího procesu. Člověk vytváří umělé záření, kterým ozařuje studovaný objekt, přičemž přesně zná frekvenci, modulaci, polarisaci, intenzitu a prostorové rozložení záření. Porovnání záření vyslaného se zářením odraženým od cílového objektu dovoluje redukovat naše informace o pohybu cíle (nebo Země), o rotaci cíle, kvalitě jeho povrchu a topografii, ev. o atmosféře. Je také možno získat informace o prostředí, kterým záření radaru po celou dobu experimentu procházelo.

Základním vztahem radarové astronomie je radarová rovnice — vztah mezi intenzitou přijaté ozvěny, vlastností cíle, jeho vzdáleností a pozorovací aparatury:

$$(1) \quad P_R = \frac{P_T G_T A_R \sigma}{(4\pi r^2)^2}$$

$$(2) \quad A_R = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_R$$

kde r — vzdálenost cíle od pozorovatele, σ — radarový účinný průřez, P_T — výkon vysílače, G_T — zisk vysílací antény, A_R — apertura přijímací antény, G_R — zisk přijímací antény, λ — pracovní vlnová délka.

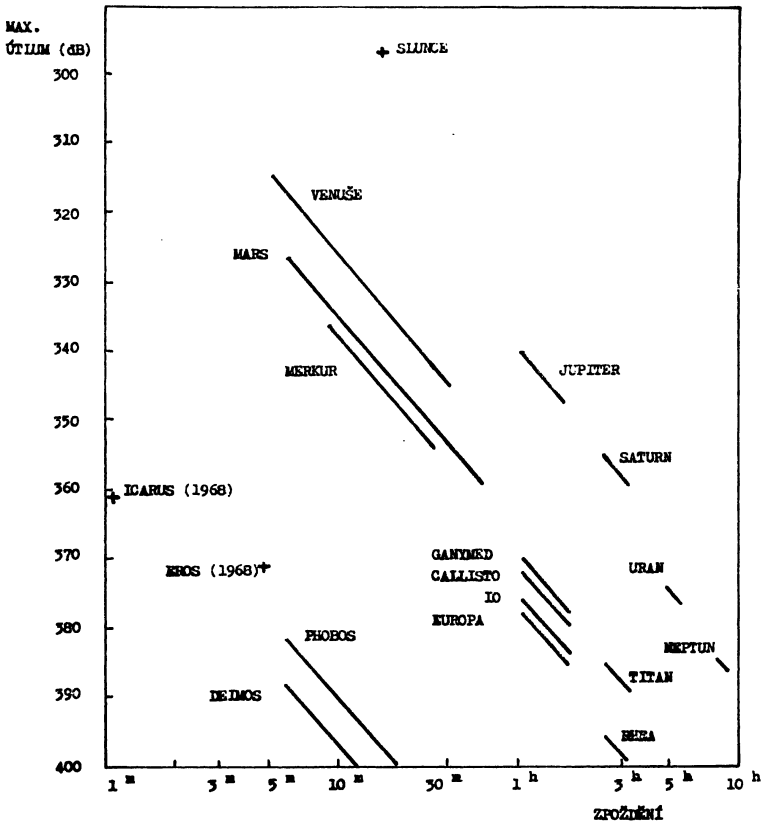
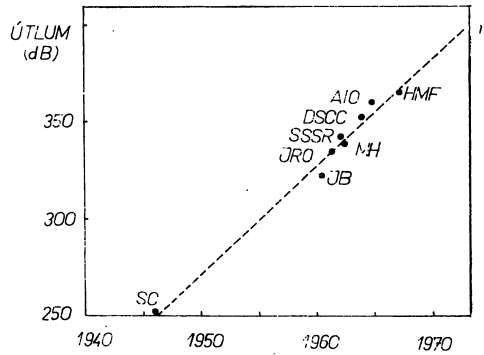
Radarový účinný průřez je vždy menší než geometrický průřez. V případě velkého cíle nezahrnou ani poměrně dlouhé radarové pulsy celý rozsah zpoždění, způsobeného ozářeným povrchem. Podobně rotace cílového tělesa působí změnu frekvence odraženého signálu; jestliže přijímací filtr je příliš úzký, signál bude ztracen.

Rozptylové vlastnosti cíle mohou být formulovány pomocí rozptylových funkcí, které popisují dvojrozměrný odraz od cíle (zpoždění infinitesimálně krátkého pulsu a frekvence idealisované netlumené sinusové vlny). Pak lze účinný průřez σ spočítat z časových a spektrálních charakteristik vysílané vlny, rozptylových funkcí a filtrových charakteristik přijímacího systému. Rozptylová funkce závisí též na povrchových vlastnostech cíle — odrazivosti a jakosti povrchu. Jejich vliv je však podmíněn rozměry a relativní rotací tělesa.

Zisk antény, který vstupuje do radarové rovnice dvakrát, je úměrný apertuře antény a proto hlavním zdrojem pokroku v radarové astronomii byla stavba velkých antén. Největší současná anténa má průměr 300 m (Arecibo Ionospheric Obs., Porto Rico). Význam mají i geometrické vlastnosti tvaru anténního reflektoru.

Důležitým prvkem radarové techniky je frekvence. Pro danou aperturu antény je zisk antény nepřímo úměrný druhé mocnině pracovní vlnové délky. Samozřejmě se vyžaduje co největší vysílací výkon: planetární radary pracují s výkony 100—150 kW a používá se ojediněle výkonu až 500 kW. Pro radarovou astronomii lze použít jak

Obr. 1. Vývoj radarové astronomie. Na ose y je vyneseno útlum, který je každý radar schopen překonat. Tečkami jsou znázorněny některé experimentální mezníky: SC Signal Corps, JB Jodrell Bank, JRO Jicamarca Radar Observatory (Peru), MH Millstone Hill, MIT Westford USA, SSSR — Ústav Radiotechniky a elektroniky Krym, SSSR, DSCC — JPL, Goldstone, USA, AIO Arcicibo Ionospheric Observatory, Arcicibo, Porto Rico, HMF Haystack Microwave Facility, MIT Tyngsboro, USA.



Obr. 2. Dosah radarové astronomie. Útlum signálu je vyneseno proti zpoždění signálu. Rozptýl je způsoben změnami vzdálenosti od Země. Dosavadní možnosti viz obr. 1.

vysílání pulsního, tak spojitého. Spojité se používá zejména pro měření frekvenčního posuvu (frekvenční spektrum), zatímco pulsní je zejména vhodné pro měření časového zpoždění. Třetím elementem — vedle vysílače a cíle — je přijímač. Jeho důležitým parametrem je šumová teplota, již je určen nejslabší registrovatelný signál. V současnosti se pracuje se šumovými teplotami až 15 °K; praktická spodní hranice je dána pozadím oblohy v radiovém oboru záření.

Neustálá zlepšení ve všech uvedených směrech zvyšovala citlivost radarové techniky od roku 1946 o jeden řád za každé dva roky. Seznam největších užívaných radarů je v tab. 1.

ZPŮSOBY MĚŘENÍ, POUŽÍVANÉ V RADAROVÉ ASTRONOMII

Radaru se v astronomii používá pro několik základních typů měření, jejichž stručný přehled uvádíme [2, 3].

Časové zpoždění

Interval mezi vysláním signálu a zachycením jeho ozvěny lze měřit radarem, pracujícím pulsně i spojitě. Hlavním nedostatkem této metody je skutečnost, že není možno měřit ozvěnu od jediného pulsu. Ve většině případů musí být signál integrován po několik hodin a nejméně je nutno sčítat ozvěnu od několika set až tisíc pulsů. Při tom se pochopitelně časové zpoždění mění a pozorování znehodnocuje. Je tedy nutno mít již předem poměrně přesné informace o pohybu cíle, aby integrací nebyly ozvěny vymazány. Při užití kódovaných pulsů je možno určení časového zpoždění poněkud zpřesnit. Obtíže způsobuje také konečná délka pulsu, konečný rozměr cíle a nutnost filtrovat přijímaný signál. Zejména konečný rozměr cíle, který není možno aktivně ovlivňovat, způsobuje rozšíření pulsu, což zhoršuje přesnost určení zpoždění.

Dopplerův posuv

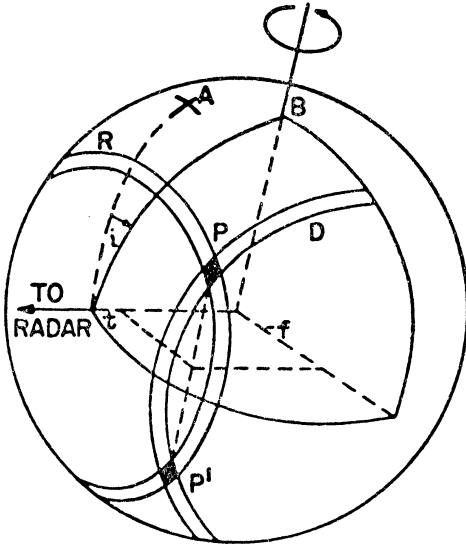
Protože se Země vůči cíli pohybuje a pohybuje se také radar vzhledem ke středu Země, bude se frekvence vysílaného a přijímaného signálu poněkud lišit. Jistá změna frekvence je také způsobena rotací cíle (s výjimkou bodu, ležícího na spojnici pozorovatel — střed cíle). Kvůli snížení šumu mají přijímací filtry většinou velice úzké pásmo propustnosti a pohyb cíle je nutno uvažovat také zde. Přesnost měření Dopplerova posuvu je v podstatě omezena stabilitou oscilátoru radarového systému.

Tabulka 1

NĚKTERÉ VELKÉ RADARY, POUŽÍVANÉ V ASTRONOMII

Organisace	Místo	Uživatel	Frekv. [MHz]	Antény [m]	Zisk antény [dB]	Apertura [m ²]	Výkon [kW]	Pulsy	Max. útlum zachytitelný stanicí [dB]
<i>Deep Space Com. Complex</i>	Goldstone, Calif.	Cal. Tech, JPL	hl. 2388	27-vysílač 70-přijímač parab.	55	355	100 (1969) 500	kontin.	350 (372)
<i>Arecibo Ionosph. Observatory</i>	Arecibo, Puerto Rico	Cornell U.	430	300 kulová	méně než 57	20000	150 (1970) 500	0,03—10,0 ms	358 (387)
<i>Haystack Microwave Facility</i>	Tyngsboro, Mass.	MIT, Lincoln Lab.	8000	40 parab.	(66,8)	(525)	150—400	kontin.	365
<i>Jodrell Bank</i>	Jodrell B., Británie	Manchester Univ.	408	75 parab.	47,3	2300	1,5 5,0	30 ms kontin.	322
<i>Millstone Hill</i>	Westford, Mass.	MIT, Lincoln Lab.	1295	25 parab.	46,5	190	150	0,04—4,0 ms	338
<i>Krymské středisko pro kosmická sledování</i>	Krym, SSSR	Institut radiotechniky a elektrotechniky	700	8 × 16 m parab. na rámu	46,8	700	(60)	kontin. (pulsné?)	340

Měsíc i planety jsou ve srovnání s délkou vlny radarem vysílaného záření relativně velké. Jestliže si představíme, že elementární plocha na povrchu planety odráží nezávisle na okolí, pak z každé takové elementární plochy obdržíme odraz s určitým časovým zpožděním a s určitým Dopplerovým posuvem. To je základní myšlenka mapování planet.



Obr. 3. Schema radarového mapování „zpoždění — frekvenční spektrum“. Plochy P a P' mají stejné zpoždění i frekvenci, A je skutečný pól tělesa, B pól zdánlivé rotace, D je oblast se stejným posuvem frekvence, f. R je oblast stejného zpoždění (= vzdálenosti).

Představme si odraz přísně monochromatického, velmi krátkého radarového pulsu. Přijímač zachytí signál v časovém intervalu, který bude definován jako dvojnásobek poloměru cíle, přičemž v každém úseku tohoto intervalu bude přicházet odraz od určitého prstence na cíli. Současně předpokládejme, že cíl bude vykazovat jistou rotaci a proto všechny body ležící v rovině rovnoběžné s rovinou, v níž leží radar a rotační osa, budou vykazovat stejný Dopplerův posuv. Každý pás na povrchu je tedy definován stejným Dopplerovým posuvem a každý prsteneček stejným časovým zpožděním. Můžeme tedy celý povrch planety mapovat v souřadnicích: časové zpoždění/frekvenční posuvy (spektrum). Ovšem jak je z obr. 3 patrné, od tohoto vztahu nelze jednoznačně přejít ke geometrické interpretaci.

Polarisace

Polarisace ozvěny je ovlivněna polarisací vysílané vlny, vlastnostmi prostředí mezi vysílačem a cílem a rozptylovými vlastnostmi povrchu cílového tělesa. Nejvýznamnější poruchy při šíření nastávají, jestliže vlna prochází plasmatem v magnetickém poli. Pak může docházet k Faradayově rotaci, tzn. lineárně polarisované záření se

mění na záření s kruhovou polarisací. Nad frekvencí 2500 MHz je vliv prostředí zanedbatelný, pro nižší frekvence je možno ze změny polarisace usuzovat na vlastnosti zemské nebo planetární ionosféry a magnetického pole. Pro odstranění Faradayovy rotace používá se kruhově polarisované vlny. Při odrazu na hladké ploše zhruba kolmé k dopadajícímu záření bude se polarisace měnit předpokládaným způsobem, ale stupeň polarisace se nezmění. Při hrubém povrchu, jehož rozměry jsou srovnatelné s vlnovou délkou, dojde k depolarisaci, která je pak jedním z nejlepších indikátorů stupně drsnosti zkoumaného povrchu.

Účinný průřez [6, 7]

Zjištění radarového účinného průřezu je důležité pro určení odrazivosti cíle. V mnoha ohledech je to jeden z nejobtížnějších úkolů, protože vyžaduje znalost absolutních hodnot všech veličin z radarové rovnice (tj. výkon vysílače, zisk antény, ztráty systému a energii ozvěny). Při měření výkonu vysílače je absolutní přesnost 10—25%. Ztráty systému jsou známy s přesností 10%, jsou však zanedbatelně malé. Nejobtížnější je zjišťování zisku antény, neboť ke kalibraci je nutno použít přírodní radiového zdroje (obvykle Cas A); chyba určení je 10—25%. Měření energie odraženého záření lze provést s přesností 10% srovnáním s kalibračním zdrojem. Kombinací všech uvedených chyb měření nedosáhneme nikdy větší přesnosti než 25%, přičemž 100% je v mnoha případech realistický odhad.

Bistatický radar [3]

Pro zlepšení dosahu radarové astronomie by bylo účelné používat bistatického radaru (vysílač a přijímač odděleny). Zvláště výhodné se ukazuje umístění vysílače do blízkosti zkoumaného tělesa (družice planety) a přijímání tohoto signálu po odrazu od studovaného tělesa na Zemi (praktické pokusy s LUNAR ORBITEREM). Zde se získávají dvě dimenze (zpoždění a frekvenční spektrum) pouze z frekvenčních měření tak, že sledujeme časovou změnu frekvenčního spektra v závislosti na změně geometrie, způsobené pohybem družice. Tato technika je analogická s holografií. Pro radarovou holografii je koherentním zdrojem radarový vysílač a objektem je planetární povrch. Chybí zde registrační film; avšak při pohybu družice získáváme směs přímého záření odrazu a rozptýlené energie, což je ekvivalentní expozici podél jedné přímky na filmu. A tak jako dostáváme třírozměrné informace z dvourozměrného záznamu na filmu, tak v případě této radarové holografie z jednorozměrného záznamu získáme dvourozměrné informace o povrchu, tj. radarovou mapu [9].

Opačný případ — příjem ozvěny na sondě — nepřipadá prozatím v úvahu pro technické obtíže.

Další možností realizace bistatického radaru je sledování radiového vysílače kosmické sondy v okamžiku začátku nebo konce zákrytu sondy planetou nebo

Sluncem, kdy vysílané záření prochází atmosférou. Taková pozorování byla prováděna u Venuše (Mariner 2/1962, Mariner 5/1967), u Marsu (Mariner 4/1965, Mariner 6, 7/1969) a dále u Slunce (Pioneer 6/1968). Tato metoda však většinou autorů není zařazována do radarové astronomie a proto se o ní podrobněji nezmiňujeme [10].

INTERPRETACE MĚŘENÍ

Rozměry sluneční soustavy

Konvenční optická pozorování nezahrnují přímá měření vzdáleností, neboť se určují pouze polohy objektů vzhledem ke hvězdám. Protože Země samotná netvoří dostatečnou základnu pro triangulaci, byla v astronomii přijata délková jednotka, určená délkou hlavní poloosy zemské dráhy (AJ = astronomická jednotka). Z 3. Keplerova zákona se určují vzdálenosti ve sluneční soustavě v poměrných jednotkách. Pozorováním některých jevů lze vyjádřit AJ v km, ovšem s přesností pouhého promile, což je pro nebeskou mechaniku v době meziplanetárních letů málo. Radarem určené vzdálenosti planet umožňují vyjádřit AJ přesněji.

Planetární dráhy a poloměry

Přesným určením vzdálenosti Země — cílové těleso je možno zpřesnit dráhové elementy obou těles a také přesněji určit poloměr zkoumané planety. Nejzajímavějším je určování vzdálenosti Země — Měsíc (ověřování obecné teorie relativity).

Rotace planet

Při pozorování radarem je rotační úhlová rychlost planety tvořena dvěma složkami: vlastní (siderickou) rotací a vzájemným pohybem radaru vůči středu planety. Abychom pochopili druhou složku, představme si, že cílová planeta nemá žádnou rotační rychlost; Země se pohybuje a pozorovateli se zdá, že se planeta otáčí. Jak je možno rotaci planety určit? Nejpřesnější je metoda „zpoždění-frekvenční spektrum“. Předpokládejme, že úsek spektra B pochází z ozvěny od jedné prstencové oblasti. Pak platí

$$(3) \quad B \cong 4f \sqrt{\left(\frac{a\tau}{c}\right)} \sqrt{\left(1 - \frac{c\tau}{4a}\right)} \sqrt{[\vec{\omega}_T^2 - (\vec{\omega}_T \vec{r}_{ZP}^0)^2]}$$

kde f — vysílaná frekvence, a — poloměr planety, c — rychlost světla, τ — časové zpoždění pro studovaný prsteneček, \vec{r}_{ZP}^0 — jednotkový vektor ve směru Země—planeta v čase odrazu,

$$(4) \quad \vec{\omega}_T = \vec{\omega}_a + \vec{\omega}_s$$

$\vec{\omega}_s$ -- vlastní úhlová rychlost rotace planety, $\vec{\omega}_a$ -- rotační úhlová rychlost způsobená pouze relativním pohybem planety a radaru. V každém bodu dráhy je tedy B úměrně projekci vektorového součtu vlastní úhlové rychlosti a zdánlivé úhlové rychlosti do roviny kolmé ke směru šíření radiových vln. Při sérii měření v různých vlnových délkách lze pro každý bod dráhy určit všechny tři skalární parametry, spojené s $\vec{\omega}_s$. Tímto způsobem lze určovat též rozměry cílového tělesa, avšak s poměrně malou přesností.

Určování vlastností povrchu

Jestliže povrch tělesa bude ideálně kulový a hladký, pak účinný průřez bude

$$(5) \quad \sigma = \pi a^2 |R|^2$$

kde a – poloměr planety, R – Fresnelův koeficient. $|R|^2 = \varrho^2$, tj. koeficient odrazivosti. Za předpokladu, že materiál povrchu je ideálním dielektrikem, je

$$(6) \quad R = \frac{1 - \sqrt{K}}{1 + \sqrt{K}}$$

kde K – relativní dielektrická konstanta povrchové vrstvy. Pro skutečné těleso, jehož povrch není ideálně kulový, je radarový účinný průřez

$$(7) \quad \sigma = \pi a^2 \bar{q}^2 \varrho$$

kde \bar{q}^2 – střední hodnota koeficientu odrazivosti („albedo“) povrchu, určeného elektromagnetickými vlastnostmi materiálu, ϱ – pomocný koeficient určený vztahem

$$(8) \quad q = \frac{4\pi \int_0^{\pi/2} \sigma_1(\theta) \sin \theta \, d\theta}{\int_0^{\pi/2} d\theta \int_0^{\pi/2} d\Phi \int_0^{2\pi} \sigma_1(\theta, \Phi, \beta) \sin \theta \sin \Phi \, d\beta}$$

kde: $\sigma_1(\theta) = \sigma_1(\theta, \Phi, \beta)$ při $\theta = \Phi$ a $\beta = 0$; $\sigma_1(\theta, \Phi, \beta)$ – účinný průřez jednotkové plochy při dopadu rovinné vlny pod úhlem θ , Φ – úhel odrazu, β – úhel mezi rovinou dopadu a rovinou odrazu.

Vlastnosti povrchu lze určovat také metodou „zpoždění-frekvenční spektrum“. U Slunce je zapotřebí jiná interpretace např. vzhledem k plynným proudům a proměnné hustotě plasmu.

RADAROVÝ VÝZKUM SLUNCE [11, 12]

Radarem se zkoumá převážně nejvyšší část sluneční atmosféry — korona. Austral-
ský radioastronom KERR navrhl již r. 1952 příslušnou aparaturu, avšak první úspěšné
pokusy byly provedeny v roce 1959. Ozvěny od ionisované korony lze získávat
pouze v oboru poměrně značných vlnových délek. Při pracovní vlnové délce kolem
10 m Slunce obvykle velmi dobře odráží a radarový účinný průřez (mimořádně
proměnný) může několikanásobně převyšovat optický průřez. Kratší vlnové délky
jsou pohlcovány dříve, než dojde k odrazu — noří se do korony. Na neštěstí však
dlouhé vlnové délky jsou velmi rušeny kosmickým šumem. Tím je způsobeno, že
zisk antény je velmi malý. Dalšími faktory, které znesnadňují sluneční radarovou
astronomii jsou: široké dopplerovské pásmo depolarisace ozvěny a netepelný cha-
rakter radiového šumu ze Slunce.

První měření radarového odrazu ze Slunce provedli ESHLEMAN, BARTHEL a GAL-
LAGHER na frekvenci 26,5 MHz radioteleskopem Stanfordské university (plocha
antény 11 ha, výkon vysílače 40 kW, zisk antény 25 db). Bylo však získáno velmi
málo kvantitativních výsledků. Systematické pozorování od r. 1961 se nyní provádí
v El Campo (Texas) na frekvenci 38, 25 MHz s vysílačem o výkonu 480—500 kW
(J. C. JAMES). V SSSR se touto problematikou zabývá GORDON v Ústavu radiové
fyziky v Charkově.

Tabulka 2

ZMĚNA RADAROVÉHO ÚČINNÉHO PRŮŘEZU S ČASEM
(pozorování v El Campo [3, 11, 12])

Rok	měsíc	A_0/R_0^2	Rok	měsíc	A_0/R_0^2	
1962	4	1,5	1963	7	0,38	
	5	1,1		8	0,66	
	6	1,2		9	0,32	
	7	1,1		10	0,55	
	8	0,87		11	0,80	
	9	1,1		12	0,37	
	10	0,63		1964	1	1,1
	12	1,1			2	0,64
	1963	1			0,68	3
		3		0,73		

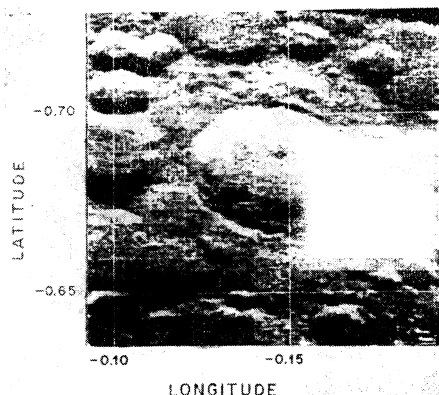
Již v začátcích výzkumu byla nalezena korelace mezi radarovými průřezy a rela-
tivním číslem, radiovým tokem 2800 MHz, geomagnetickým indexem a aktivními
poli v čáře Ca. Dále se došlo k závěru, že korona v aktivních obdobích má filamen-
tární strukturu odpovídající struktuře meziplanetární plasmy, objevené kosmickými

sondami. Účinný průřez, závisující na absorpci signálu v koroně, je funkcí celkového rozdělení elektronové hustoty a elektronové teploty v koroně. Na frekvenci 38 MHz je účinný průřez řádově $(1-3) \pi R_0^2$. Korona absorbuje na této frekvenci asi 50% dopadající energie. V klidné koroně jsou ozvěny velmi slabé. Zajímavá je podobnost mezi zářením X a slunečními radarovými ozvěnami.

RADAROVÝ VÝZKUM MĚSÍCE [8B, 13-17]

První radarové odrazy od Měsíce [15] získali v US Army Signal Corps Lab. dne 10. 1. 1946 pod vedením DEWITTA radarem o výkonu 3 kW na frekvenci 115,5 MHz. O necelý měsíc později zachytil odraz také Z. BAY (Maďarsko), který konal pokusy od r. 1944. Roku 1969 začali pracovníci australského CSIRO s pravidelným radarovým sledováním na frekvenci 17,94 a 21,54 MHz.

Obr. 4. Radarová mapa okolí kráteru Tycho na Měsíci získaná radarem Haystack Microwave Facility. Použitá frekvence 7840 MHz (3.8 cm), snímek byl pořízen 21. 3. 67. Rozlišovací schopnost je asi 1 kilometr.



R. 1959 určil BURTON z radarových měření vzdálenost Země—Měsíc s přesností na 1 km a za posledních 10 let se tato chyba zmenšila o řád. Studium ozvěn od Měsíce umožnilo též sledování ionosféry (Faradayova rotace). Zajímavé je zkoumání časových profilů ozvěny, tj. rozšíření ostrého pulsu odrazem na různých částech měsíčního povrchu v rozdílných vzdálenostech. Z tvaru časového profilu pro $\lambda = 3,6$ cm vyplývá, že 14% povrchu je pokryto objekty o rozměru vlnové délky a celkový povrch je mírně zvlněný. Pro $\lambda = 68$ cm vychází, že pouze 8% povrchu je pokryto objekty o rozměrech vlnové délky. Z tvaru ozvěny na frekvencích 30—3000 MHz vyplývá, že povrch je pokryt materiálem o malé dielektrické konstantě. Kráterové paprsky se jeví jako drsné a anomální radarový odraz koreluje s tepelnými a optickými anomáliemi. Účinný průřez je 7—10% geometrického průřezu. Dielektrická konstanta je asi 2,8, což souhlasí s optickými zjištěními a nasvědčuje poréznímu povrchu, silnému až 10 m a s rostoucí hustotou (průměrně 1 g/cm^3).

S měřením zpětlivého a frekvenčního spektra začal PETTINGILL r. 1960; rotaci Měsíce se však mění frekvence pouze o 25 Hz. Zjistilo se, že kráter Tycho odráží

o řád lépe než jeho okolí (shodně pro polarisované i nepolarisované záření). Práce na mapování Měsíce pokračovaly velkým radarem v Arecibo, který dovolil rozlišit oblasti 20×40 km. Tak bylo zjištěno, že též Copernicus, Eratosthenes, Kepler, Langrenus a jiná místa s vyšším optickým albedem odrážejí radiové záření podobným způsobem. Zlepšením techniky se podařilo dosáhnout rozlišení až 1 km [17]. Radarová mapa odpovídá optické fotografii Měsíce v úplňku, kdy útvary nevrhají žádný stín. Zatímco rozdíl tmavých a světlých částí Měsíce nepřesahuje v optickém oboru faktor 3, na radarovém záznamu se liší o faktor 10.

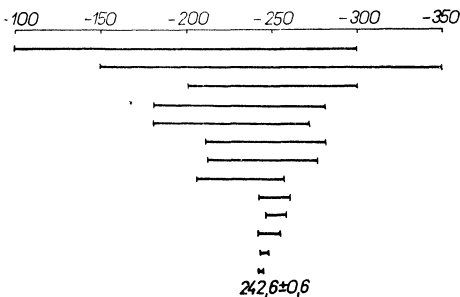
RADAROVÝ VÝZKUM PLANET [18—30]

MERKUR

Poprvé radiolokován v SSSR v červnu 1962 a dále následujícího roku v JPL (Kalifornie). Na 12,5 cm byl stanoven účinný průřez na 5% geometrického. Zajímavým objevem bylo zjištění PETTENGILLA a DYCEHO (1965), že Merkur se otáčí kolem své osy v přímém smyslu jednou za 59 ± 3 dny [20], což bylo později interpretováno jako tzv. rezonanční rotace za $2/3$ oběžné doby kolem Slunce (58,65 d). Povrch planety je dosti drsný a připomíná povrch Měsíce. SHAPIRO (1967) stanovil poloměr planety na $2434 \pm 2,2$ km [19]. GOLDSTEIN (1969) zjistil na vlnové délce 12,5 cm, že na povrchu existují nejméně 3 oblasti podstatně drsnější než okolí; jejich velikost se blíží rozměrům pozemských kontinentů. Dále byla zjištěna oblast odrážející záření velmi intenzivně, tj. pravděpodobně plochá [31].

VENUŠE

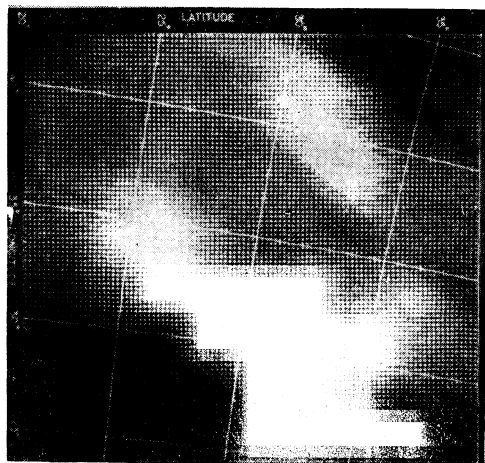
Poprvé byla radiolokována v Lincoln Lab. (PRICE 1958), avšak šlo pouze o detekci [21]. Později byl stanoven účinný průřez na 10—20% geometrického (podle λ). Zajímavým předmětem studia bylo určení rotace planety, zahalené do husté atmosféry. Vývoj udává obr. 5, poslední hodnota je $242,6 \pm 0,6$ d retrográdně [22].



Obr. 5. Radarová měření siderické rotace Venuše. Jsou vynesena radarová měření od roku 1961, což velmi dobře dokumentuje rostoucí přesnost radarové astronomie.

Poloměr stanovil nejpřesněji SHAPIRO (1967) na $6056 \pm 1,2$ km [19]. Při průletu Marineru 5 kolem Venuše, kdy bylo známo těžiště planety (ohnisko dráhy sondy), byla Venuše současně radiolokována z Areciba. Albedo povrchu je na $\lambda = 20$ cm dvojnásobně proti Měsíci, polarisace odpovídá zrcadlovému odrazu. Z charakteru

ozvěny lze usoudit, že povrch je mírně zvlněn se sklony svahů 3° – 8° při $\lambda = 20$ cm (1964). Úzké spektrum odraženého signálu naznačuje, že jde o odraz od tvrdého materiálu (EVANS). Povrch Venuše má dielektrickou konstantu 3,5–6 (ALEXANROV, RŽIGA 1968); podobnou hodnotu mají v suchém stavu zemské horniny obsahující křemík. Byly zjištěny oblasti o průměru 100–1000 km, které mají větší odrazivost, variace albeda však nepřevyšují faktor 2. Překvapujícím zjištěním bylo nízké albedo pro $\lambda = 3,6$ až $3,8$ cm (1964), způsobené snad pohlcováním v atmosféře (CO_2). Účinný průřez je zde jen 1%.



Obr. 6. Výšek z radarové mapy Venuše, získané radarem JPL Goldstone v Kalifornii. Bylo použito techniky zpoždění-frekvenční spektrum. Radar pracoval na frekvenci 2388 MHz s výkonem 100 kW. Mapa znázorňuje území velké jako Kalifornie. Tři oblasti zvýšené odrazivosti jsou asi 200 až 300 kilometrů v průměru.

V srpnu 1967 PETTENGILL a DYCE pořídili první radarovou mapu Venuše (metoda zpoždění-frekvenční spektrum) radarem v Arecibo. Sledovalo se na frekvenci 420 MHz. Zatím byla zmapována jen 1/3 povrchu této planety [23].

MARS [27–27]

Radiolokaci Marsu uskutečnili poprvé současně v SSSR (KOTELNIKOV) [24A] a v USA (v JPL — GOLDSTEIN) [24B] roku 1963. Zjistilo se, že zvýšená odrazivost koreluje s tmavými oblastmi (zvl. Syrtis Major) a opačně. Díky velké vzdálenosti a rychlé rotaci je pozorování ozvěn obtížné. Zdá se však, že povrch je hladší než u Měsíce, s rozměry povrchových detailů kolem 70 cm. Účinný průřez, stanovený šesti skupinami, je 3–14% (pro $\lambda = 3,8$ –70 cm). Při opozici r. 1965 studovali ozvěnu na 12,5 cm v JPL (SAGAN, POLLACK, GOLDSTEIN). Zjistili výškové rozdíly jasných a tmavých ploch (max. 16,5 km — Moeris Lacus, min. 4 km — Nepenthis) a usoudili, že tmavé plochy jsou vyvýšeninami se svahy asi 4° . GOLDSTEIN (1969) se silnější aparaturou však zjistil, že světlá místa mohou být jak vyvýšeniny, tak nížiny, kdežto tmavá moře mají střední výšku. Max. diference je 16 km (mezi Tharsis a Amazonis). PETTENGILLOVA měření z r. 1967, publikovaná r. 1969 a jeho nová měření nedávají žádnou korelaci mezi výškou míst a jejich optickou jasností [27].

Ze srovnání optického a radarového pozorování Marsu, provedeného PETTEN-

GILLEM (1969) vyplývá model, v němž tmavá místa jsou interpretována jako náhorní plošiny a jasná místa jako rozsáhlé pánve s pískem a sezonní jinovatkou. Zvýšení odrazivosti náhorních plošin lze vysvětlit např. odváním větrem.

JUPITER

Prozatím nejvzdálenější planeta, kterou bylo možno radarem sledovat. Registrovány byly ozvěny r. 1963 současně v USA a SSSR. KOTELNIKOV [28] pozoroval na 700 MHz (39 cm) a v JPL [29] na 12,5 cm. Sovětská skupina sledovala ozvěny po dobu 22 hod. a intenzita ozvěny byla asi 1—1,5krát větší než šum. Při amerických měřeních signál $8 \times$ převyšoval šum. V letech 1964—1967 se v Arecibo znovu pokoušeli na 430 MHz (70 cm) zachytit ozvěnu, avšak nepodařilo se jim to, ačkoliv citlivost byla zvýšena téměř $200 \times$. Rovněž pozorování v JPL stejnou aparaturou (1964) byla neúspěšná. Je možné, že negativní výsledky jsou způsobeny změnami odrazivé schopnosti Jupitera, jejichž mechanismus není znám, nebo že radarové záření je běžně zcela absorbováno a odraz byl možný pouze díky náhodné poruše. Zbývá dodat, že odraz r. 1963 byl pouze z lokalizovatelné oblasti o rozměru kolem 45° .

PLANETOIDY

První a zatím jediný odraz od malé planety byl registrován v červnu 1968 pracovníky MIT (USA) na frekvenci 7840 MHz a v JPL (USA) na frekvenci 2388 MHz. Šlo o součást celosvětového pozorování průletu planety Icarus kolem Země ve vzdálenosti 6,5 mil. km, přičemž rozměr planety se odhaduje na 0,6—1,2 km.

ZPŘESNĚNÍ ASTRONOMICKÝCH KONSTANT [7, 19, 30]

Před radarem byla nejpřesněji určena AJ z Rabeho pozorování planety Eros (1950) [30]. Při první radiolokaci Venuše byl zjištěn rozdíl asi 66 000 km! Rabe sám r. 1967 zjistil, že v jeho určení AJ byla chyba, takže i opticky určená AJ se poněkud zpřesnila. IAU se však r. 1964 rozhodla přiklonit k radarovému měření. Neuvažujeme-li chybu, způsobenou nepřesným určením rychlosti světla, je chyba v určení AJ kolem 1—2 km. Proto se často udává AJ ve světelných vteřinách (podle SHAPIRO $499,004786 \pm 0,000005$). Při $c = 299792,5$ km/s je to $149\,597892,3 \pm 1,5$ km; chyba spolu s nepřesnou rychlostí světla je o dva řády vyšší. Dále byly získány elementy drah Merkura a Venuše, těžiště systému Země—Měsíc, poměr hmot Země/Měsíc ($81,303 \pm 0,005$) a poloměry i hmoty planet Merkura a Venuše.

RADAROVÁ SLEDOVÁNÍ METEORŮ

Radar byl s úspěchem využit i pro sledování ionisovaných stop, vznikajících při průletu těles atmosférou. První snahy o taková pozorování vznikly již v době 2. svě-

tové války, kdy radary britské protivzdušné obrany sledovaly „falešná letadla“. Hned po válce HEY, LOVELL, BUNWELL dospěli k přesvědčivému závěru, že existuje těsná korelace mezi počtem ozvěn a počtem pozorovaných meteorů. Pro standartní sledování se používá převážně vlnové délky $\lambda = 10$ m; spodní mez je dána malou intenzitou stopy. V posledních letech bylo možno pozorování rozšířit i na decimetrové vlny. Pozoruje se i v denních hodinách a lze získat též spolehlivější údaje o rychlostech meteorů. Významným příspěvkem je výzkum vysoké atmosféry touto nepřímou sondáží a byly již podniknuty pokusy o spojení odrazem od stopy. Rozvoj družic a sond umožnil tato pozorování vydatně doplňovat.

Závěr

Radarová astronomie byla nutnou předchůdkyní aktivního výzkumu Sluneční soustavy, rozšiřující znalosti nebeské mechaniky i fyziky planet. Důležitou roli sehrála při výzkumu meziplanetární hmoty (meteorů) a vysoké atmosféry ještě před érou družic. Významné byly výsledky studia mikrostruktury Měsíce a radar je dodnes jediným přístrojem pro studium podpovrchových vrstev Měsíce. Kosmonautika na druhé straně přinese další rozvoj radarové astronomie zejména tím, že umožní bistatickou radiolokaci u blízkých planet. S rozvojem techniky bude možno uvažovat i o umístění monostatického radaru na palubě sondy a tím získávání radarové mapy planet, podobně jako se dnes mapuje Země z letadel.

Literatura

- [1] GRÜN M., KOUBSKÝ P.: Pokroky mat. fys. astr. 14 (1970), 62.
- [2] PETTINGILL G. H., SHAPIRO I. I.: Ann. Rev. of Astronomy and Astrophys. 3 (1965), 377.
- [3] ESHLEMAN von R.: Science 158 (1967), 585.
- [4] *Planetary Astronomy*, National Academy of Sciences, 1968, Washington D. C.
- [5] GREEN P. E.: J. Geophys. Res. 65 (1960), 1108.
- [6] EVANS J. V., HAGFORS T.: Icarus 3 (1964), 151.
- [7] KRUPENIO N. N.: Kosmičeskije issled. 5 (1967), 758.
- [8] *Draft Reports — 13th General Assembly of IAU*, Prague 1967:
 - [A] Commis. 16 (planetární fyzika), 310.
 - [B] Commis. 17 (Měsíc), 349.
- [9A] TYLER G. L., ESHLEMAN von R. et al.: Science 157 (1967), 193.
- [9B] TYLER G. L.: J. Geophys. Res. 71 (1966), 1559.
- [10A] JAMES J. C., INGALLS R. P.: Astron. J. 72 (1967), 338.
- [10B] KLIJORE A. J.: *Paper pres. before the 7th Internat. Space Science Symp.*, COSPAR, Vienna 1966.
- [11] OLMR J.: Kosmické rozhledy 7 (1969), 105.
- [12] CHISHOLM J. H., JAMES J. C.: Astrophys. J. 140 (1964), 377.
- [13] KOPAL Z.: *The Moon*, Reidel Publ. Co., Dordrecht 1969.
- [14] HAGFORS T.: *The Nature of the Lunar Surface*, Proceedings of the IAU/NASA 1965 Symp., Baltimore 1966.

- [15A] BAY Z.: Hung. Phys. Acta 1 (1946), 1.
- [15B] DEWITT J. H., STODOLA E. K.: Proc. Inst. Radio Engrs. 37 (1949), 229.
- [16] HAGFORS T. et al.: Science 150 (1965), 1153.
- [17] PETTENGILL G. H., THOMPSON T. W.: Icarus 8 (1968), 457.
- [18] RŽIGA O. N.: Kosmičeskije Issled. 7 (1969), 84.
- [19] ASH M. E., SHAPIRO I., SMITH W. B.: Astron. J. 72 (1967), 338.
- [20] PETTENGILL G. H., DYCE R. B.: Nature 206 (1965), 1240.
- [21] PRICE P. E.: Science 129 (1959), 751.
- [22] GOLDBREICH P.: Nature 209 (1966), 1117.
- [23] ZOHAR S., GOLDSTEIN R. M.: Nature (27. 7. 1968), Sky and Telescope 36 (1968), 139.
- [24A] KOTELNIKOV V. A. et al.: Doklady AN SSSR 151 (1963), 811.
- [24B] GOLDSTEIN R. M.: Science 150 (1965), 1715.
- [25] SAGAN C., POLLACK J. B., GOLDSTEIN R. M.: Astron. J. 72 (1967), 20.
- [26] ZACHS A., FUNG A. K.: Space Science Rev. 10 (1969), 442.
- [27] PETTENGILL G. H. et al.: Astron. J. 7 (1969), č. 4.
- [28] KOTELNIKOV V. A. et al.: Doklady AN SSSR 155 (1964), 1037.
- [29] GOLDSTEIN R. M.: Science 144 (1964), 842.
- [30] RABE E.: Astron. J. 55 (1950), 112; opravy Astron. J. 72 (1967), 852.
- [31] GOLDSTEIN R. M.: Science 168 (1970), 467.

PORUCHY DRÁHY DRUŽICE PŮSOBENÉ TLAKEM SLUNEČNÍHO ZÁŘENÍ

PETR LÁLA, Ondřejov

Pohyb umělých družic Země je jedním z nejsložitějších problémů nebeské mechaniky, která zkoumá dráhy kosmických těles. Je to proto, že družice se pohybují blízko Země a sebemenší poruchy jejich dráhy se projeví při pozorování. Na pohyb družice působí nerovnoměrné rozložení hmoty uvnitř Země, odpor vzduchu, přitažlivost Slunce a Měsíce, tlak slunečního záření a další rušivé síly. Jestliže máme k dispozici teorii vlivu jednotlivých sil na pohyb družic, je možno z pozorování získat velmi důležité geofyzikální a geodetické údaje — především o přesném tvaru Země a o změnách hustoty vysoké atmosféry. Přesnost současných pozorování je tak veliká, že je nutno velmi pečlivě vylučovat i malé efekty, které se původně považovaly za zanedbatelné. Tak je tomu i s tlakem slunečního záření, který se uvažoval pouze pro lehké balonové družice typu Echo.

1. VELIKOST TLAKU ZÁŘENÍ

Z kvantové teorie záření je známo, že každé kvantum monochromatického záření s frekvencí ν nese kinetickou energii $h\nu$, kde h je Planckova konstanta $6,6256 \cdot 10^{-27}$ erg.sec. Prochází-li 1 cm^2 celkem N fotonů, pak nesou celkovou energii