

Počítače ve vesmíru

David Ondřich

Hard a soft jsou předpony dvou pojmů, jejichž společná část, „ware“, v angličtině označuje leccos. Ačkoliv anglické slovo hardware najdete v mnoha významech v nemalém počtu textů, jejichž náplň s počítači tak úplně nesouvisí (pokud je něco takového ještě dnes možné), termín „software“ už dnes najdete téměř bez výjimky pouze v počítačových manuálech a příručkách. Obě oblasti techniky dnes mají mnoho společného a můj i váš život by bez nich velmi pravděpodobně vypadal úplně jinak. A to ani já, ani vy nežijeme ve volném kosmickém prostoru.

Nechme protentokrát stranou skutečnost, že není jednoduché rozhodnout, kde vlastně je hranice mezi hardwarem a softwarem, a pojďme se podívat na to, jak vlastně vypadají ty „počítače“, které řídí (nebo taky někdy úplně neřídí) život družic, které dnes létají prostorem, ať už jsou na oběžné dráze kolem Země, Jupiteru, Titanu, Slunce, nebo míří ven ze sluneční soustavy. Když si prohlížíte jakýkoliv obrázek, který pořídila nějaká družicová observatoř (třeba Hubbleův kosmický dalekohled), vždycky se díváte na něco, co mnohokrát prošlo hardwarem a softwarem nejružnějších počítačů, z nichž minimálně jeden pracoval ve volném kosmu.

Dohodněme se, že hardware je to, „na co se dá sáhnout“, a software je to všechno ostatní, co „žije uvnitř“ onoho hardwaru. přičemž samozřejmě ponecháme stranou „nepočítačový“ hardware kosmických plavidel.

Počítače

První satelit, který byl vybaven počítačem, byla americká družice Gemini. Počítač to byl

z dnešního hlediska velmi primitivní a pocházel z vývojových laboratoří firmy IBM. Těžko se hledá nějaké srovnání s výkonem, vlastnostmi nebo vzhledem dnešních počítačů, protože by to bylo srovnání nesrovnatelného (ovládací prvky sestávaly sestávaly ze dvou přepínačů, jednoho tlačítka a dvou signalizačních kontrolky). Těžko by ovšem projekt Gemini dosáhl úspěchů, kdyby počítače neexistovaly. Dřívější satelity sice neměly výpočetní techniku na palubě, o to více jí však měly za sebou, nebo spíš pod sebou, v řídicích střediscích (dokonce řádově více, zejména pokud bychom měřili v metrech krychlových).

Těžko říct, kdy a kdo první realizoval myšlenku použít k dosažení vesmírného prostoru výpočetní techniku, s největší pravděpodobností bylo již v začátcích využití počítačů jasné, že tato technika s velkou pravděpodobností pomůže zdolat tak vysoký cíl. Ve skutečnosti měly počítače nezastupitelnou úlohu již při vývoji a přípravách kosmických programů, ať už se jednalo o výpočty startovacích oken, průběžné zpřesňování drah jednotlivých misí, apod.

Později, kdy se naplno rozběhly závody o dobytí kosmu mezi USA a Sovětským svazem, již bylo uskutečnění vesmírných letů bez počítačů naprosto nemyšlitelné. Počítače pomáhaly při vývoji techniky, při simulování kritických situací, ale i při výcviku budoucích členů lidské posádky. Také stále složitější úkoly, které se po jednotlivých misích požadovaly přímo na oběžné dráze, vyžadovaly přítomnost počítačů na palubách pilotovaných i nepilotovaných letů.

Ponechme nyní stranou počítače, které „pouze“ pomáhaly vytvoření a vzletu družic a kosmických lodí, a pojďme se podívat na ty počítače, které se do volného kosmu dostaly (nebo k tomu aspoň byly určeny).

Hardware

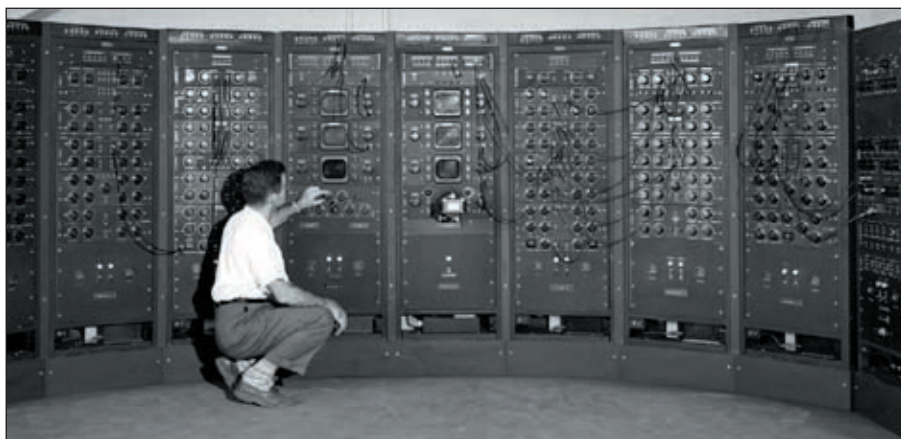
Není asi příliš překvapivé, že první umělé družice, které člověk sestrojil, žádné počítače neměly, protože je k ničemu nepotřebovaly. Dokonce i dnes, kdy je přítomnost počítačů na palubě družic naprosto samozřejmá, je možné si představit satelity, které by se bez výpočetní techniky dokázaly obejít. Poněkud překvapivější je fakt, že dokonce i první pilotované lety se konaly bez účasti výpočetní techniky na palubě.

Další zajímavá věc je, že počítače se dříve účastnily pilotovaných letů, než jim byla svěřena péče o lety bez lidské posádky. Je to naprosto logické vzhledem k možnostem ovládání těchto prvních počítačů a malé provázanosti jednotlivých systémů kosmických plavidel – telemetrie, ovládání motorických částí, systémy pro kontrolu stavu družice – to všechno byly systémy víceméně autonomní, spojené pouze společnou závislostí na dodávce energie.

Miniaturizace

I když je z dnešního hlediska poněkud úsměvné mluvit o miniaturizaci prvních počítačů, začátkem šedesátých let se jednalo o skutečnou výzvu, jak směstnat tehdejší hardware (v té době ještě nebyla technologie integrovaných obvodů vhodná k nasazení v takové misi) do nevidaně malých rozměrů (počítače v té době zabíraly klimatizované místnosti). Potřeba učinit počítač co nejmenší také znamenala značné omezení výkonu a taktéž implikovala, že hardware nebyl nijak redundantní – jakákoli chyba znamenala přerušení výpočtu a reset systému, bez ohledu na možné důsledky takového kroku.

© Courtesy of NASA



Jeden z analogových počítačů (Lewis Flight Propulsion Laboratory), které stály u zrodu kosmického programu. Tento počítač nepoužíval dvojkovou soustavu (jedničky a nuly).

Důraz, který byl kladen na dobytí vesmíru (a s ním spojený přísun velkého množství peněz), umožnil v poměrně krátké době vylepšení nejrůznějších technologií, které poskytl prostor konstruktérům počítačů k tomu, aby mohli zvýšit tolik potřebný výkon. Jako u mnoha dalších technologií, i v případě počítačů šlo jejich vylepšování ruku v ruce s využitím získaných poznatků pro „nekosmické“ účely – díky vývoji techniky bylo možné nastartovat rychlý růst počítačového průmyslu.

Situace se relativně rychle otočila a zatímco v počátcích letů do vesmíru byly počítače vyvíjeny nebo speciálně upravovány pro potřeby družic a kosmických lodí (a až poté byly tyto úpravy využity pro výrobu pozemských počítačů), o pár desítek let později dosáhly vlastností běžně vyráběných počítačů takových hodnot, že se výbavou kosmických lodí vesměs staly právě standardní součástí pozemských počítačů, které se jen různě kombinují a doplňují pro potřeby kosmické techniky.

Obvody na grilu

Hlavní problém techniky ve volném kosmu by se dal zhruba charakterizovat takto: uvést do provozu zcela běžný počítač je jednoduché, ale udržet ten počítač v provozu je mnohem náročnější. Nástrah, které na „železo“ ve vesmíru číhají, je mnoho. Některé je jednoduché obejít, ale některé ne.

Skutečnost, že každou součástku, kterou potřebujete chladit – a chlazení vyžaduje velká část počítačového hardwaru – musíte vybavit buď větrákem nebo jiným chladicím systémem (protože horký vzduch bude v prostředí mikrogravitace jen velmi neochotně odnášet přebytek tepelné energie z výparníků – pokud okolo vůbec nějaký vzduch je), je ještě poměrně logická. Poněkud horší je to např. s běžnými harddisky. Ty stále menší (rozměrově) a větší (kapacitou) disky, které na Zemi uchovávají a poskytují *supermegahyper*baity dat, překvapivě potřebují dostatečný atmosférický tlak. Většina pilotovaných letů ovšem probíhá za nižších tlaků, než je běžný atmosférický. Lidský organismus si s poklesem tlaku poradí podstatně lépe než harddisk a bylo by poněkud nepříjemné přijít kvůli ztrátě části vzduchu v lodi o všechna data na harddiscích. Proto se i v dnešních lodích a družicích používají pásky – jednak mají dostatečnou kapacitu i při paralelním ukládání dat, jednak jsou mnohem spolehlivější.

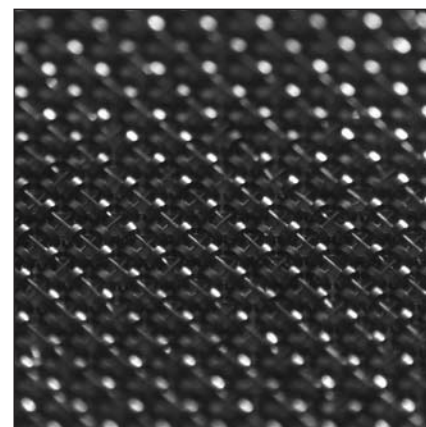
V rozporu s tím, co většinu lidí napadne, není dnes pro většinu používaných počítačů příliš kritické kosmické záření. Jednak přímé účinky kosmického záření zpravidla nebývají tak drastické (vzhledem k rozměrům počítačové techniky je pravděpodobnost zásahu nějakou velmi energetickou částicí poměrně zanedbatelná), ale také pro mnoho výpočetních úkonů případná chyba nevede, pokud nedojde k nezvratnému poškození techniky. Pravděpodobnost takové poruchy se téměř blíží nule, pokud už by k ní došlo, s velkou pravděpodobností bude poškozena i jiná součást družice, takže funkčnost celého systému bude omezená a systém pravděpodobně bude prohlášen za ztracený.

Systémy, které jsou pro provoz družice nebo lodi životně důležité, samozřejmě proti záření chráněné jsou. Používají se speciálně upravené čipy odolné vůči záření (např. se snižuje hustota tranzistorů na čipu) a pokud je to možné, staví se systémy tak, aby byly redundantní, což znamená, že systém je zdvojený nebo ztrojený (či ještě více -násobný) a porovnávají se výsledky výpočtů z obou (všech) jednotek systému. Pokud se výsledky jednotlivých subsystémů liší, buď se výpočet zopakuje, nebo se za pomoci sofistikovaných algoritmů hledá, která jednotka je poškozená, a ta se v dalších výpočtech vynechá.

Od drátů k programům

Když se začaly připravovat první automatické družice, které se měly vydat do meziplanetárního prostoru, bylo už zřejmé, že se bez samostatné řídicí jednotky neobejdou. Na přelomu padesátých a šedesátých let minulého století ještě ovšem nebyly k dispozici počítače, které by bylo možné na takové mise vyslat. Řešení se našlo v podobě sekvencérů, což jsou v podstatě jednoúčelové kalkulačky, do jejichž obvodů jsou „zadrátovány“ potřebné algoritmy (sekvence).

První sekvencéry neměly žádný software v tom smyslu, jak jej chápeme dnes, pouze na základě vstupů ze senzorů provedly příslušný výpočet a výsledek odeslaly výstupnímu zařízení. Později byly tyto sekvencéry vylepšeny o malé množství paměti, jejíž obsah bylo možné v průběhu letu měnit. Jednoduchost těchto výpočetních jednotek musela být ovšem vyvážena množstvím operačních příkazů, které řídicí středisko ze Země vyslalo k družicím (obzvláště v tomhle ohledu vynikly pozdější Marinerky).



Detailní pohled na počítačovou paměť tvořenou feritovými magnetickými jádry a systémem drátů z různých kovů (každým jádrem prochází čtyři dráty). Výhoda vysoké trvanlivosti uložené informace vyvažuje nevýhody – vysoké provozní napětí, destruktivní vyčítání, velký objem a hmotnost, proto se i dnes tyto paměti používají (a nejen pro kosmické účely).

Postupem času se hardware nepilotovaných letů také vyvíjel, takže již koncem šedesátých let velmi připomínal hardware (tehdy) běžných počítačů. V té době také dosáhla vrcholu schopnost inženýrů a programátorů přeprogramovat kompletně celý „operační systém“ družic – v případě meziplanetárních družic se jim tento kousek podařil podle dostupných informací dokonce několikrát (dnes je to už těžko myslitelné – počítače jsou mnohem složitější a času je stále stejně, tedy málo).

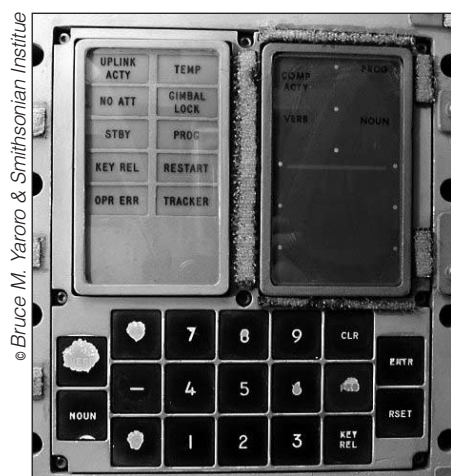
Dnes vypadá hardware na družicích tak, že pokud se jedná o skutečně důležitý systém, všechny součásti se zdvojují nebo ztrojují, jsou vybaveny systémy pro detekci chyb a jsou co možná nejjednodušší. Naopak všechny ostatní systémy se ponechávají napospas obyčejným počítačům, které mohou být v případě potřeby velmi rychle resetovány.

Software

V předchozí části už jsme tak trochu nastínil hlavní problémy té „programové“ části počítačů ve volném kosmu. Kromě jisté nespolehlivosti hardwaru jsou to (i v dnešní době) především omezení výkonová a kapacitní. A největší problém softwaru – chyby.

Šetřit, šetřit, šetřit

Paměti málo, času ještě méně. Tak by se asi dal charakterizovat první „počítač“ (ve skutečnosti programovatelný sekvencér), který skutečně letěl vesmírem. Prostředky, které měly první „programy“ k dispozici, jsou z dnešního pohledu téměř neuvěřitelné – dvacet dvaadvacetibitových slov paměti ve



„Klávesnice“ a „monitor“ počítače lodí Apollo, tato konkrétně z modulu *Odyssey* lodí Apollo 13

třech registrech, z každého slova byly ještě první čtyři bity vyhrazeny pro „operační kód“, paměti v jednotlivých registrech byly feritové s destruktivním vyčítáním (vše šlo tedy přečíst pouze jednou). Jedna chybná instrukce znamenala zpravidla selhání celého počítače.

Zatímco pozemské počítače se od začátku sedmdesátých let rozvíjely opravdu bouřlivě, počítače na družicích se tak trochu pozastavily ve vývoji – kvůli nutnosti výpočty distribuovat (ve skutečnosti hrály roli i další důvody) se muselo šetřit místem, takže výkonu i operační paměti měly ve srovnání s pozemskými protějšky stále relativní nedostatek. Od počátku to znamenalo především výzvu programátorům, kteří se museli poprat s nelehkými problémy.

Programovací jazyky

K programování počítačů pro družice a kosmické lodí bylo v průběhu historie vytvořeno několik programovacích jazyků, ale žádný z nich se nedočkal velkého rozšíření. Jazyky používané v počátcích byly velmi úzce svázané s konkrétním hardwarem, naopak jazyky obvyklé v „nekosmické“ počítačové branži byly v mnoha ohledech nevýhodné – moc „nenažrané“, pomalé, kompilátory povolovaly příliš velké množství chyb.

Je velmi těžké snažit se nějak postihnout celou škálu použitých jazyků, protože se téměř dá říct, že projekt od projektu se programové vybavení družic liší. Stálíci jsou v tomto ohledu pouze americké raketoplány, které téměř dvacet let dokázaly létat s téměř stejným programovým vybavením (lepší prostě nebylo potřeba, ostatně stejně jako

hardware) – i zde se však zřejmě situace po tragédii raketoplánu Columbia změnil.

Rutiny pro výpočet efemerid nebo přepočty lokálních časů jsou sice pro většinu družic stejné, ovšem největší část softwaru tvoří systémy pro ovládání nepočítačového hardwaru – vědecké přístroje, telemetrie, systémy pro sledování stavu družice apod. Tyto části jsou vesměs jedinečné, takže zpravidla jen malá část kódu se dá použít víckrát než jednou. Své v tomto sehrává i rivalita mezi jednotlivými výrobci – kosmické agentury zpravidla specifikují pouze minimální požadavky na rozhraní jednotlivých systémů družic a jak si s problémem systém poradí uvnitř, je čistě jeho záležitost.

Když 1 + 1 není 2

Přestože nejsou chyby způsobené radiací ve vesmíru příliš časté, občas se přece jen stannou. Pak je na softwaru, aby se s tím nějak vyrovnal a pokusil se takovou chybu nějakým způsobem ošetřit. Nejobvyklejší způsob je samozřejmě ten, který už byl zmíněn – výpočet se nechá provést několika nezávislými jednotkami, výsledky se porovnají, a pokud se liší, buď se vyhledá, která jednotka udělala chybu, nebo se výsledky zahodí a výpočet se provede znovu. V počátcích letů do kosmu se tato technika realizovala prostřednictvím porovnávání výsledků z vesmíru a z pozemského řídicího střediska, ovšem s rostoucí potřebou autonomie družic a plavidel se stále víc kontrol přenášelo přímo do vesmíru.

Každého samozřejmě napadne myšlenka, jak software, který kontroluje výsledky výpočetních jednotek, pozná, že chyba nastala v některé z jednotek a ne v kontrolním systému. Odpověď je jednoduchá – buď má k dispozici mechanismus, kterým to pozná (např. nejrůznější kontrolní součty, paritní bity registrů apod.), nebo to nepozná a postupuje podle připraveného scénáře.

Veselé historky z natáčení

Nejpalčivější problémy softwaru ovšem způsobují programátoři. Je to sice poněkud tvrdé konstatování (leckdy je na vině spíše chybějící testování nebo špatné řízení projektů), ale je to tak. Největším nebezpečím pro počítačový program je zpravidla program sám, v případě počítačů v kosmu to platí několikanásobně. Základní programátorskou zásadu, testovat všechny vstupní hodnoty, je v komplikovaném prostředí družic někdy velmi těžké dodržet.

Na závěr proto jako drobné osvěžení uvedme několik kuriózních chyb, které se

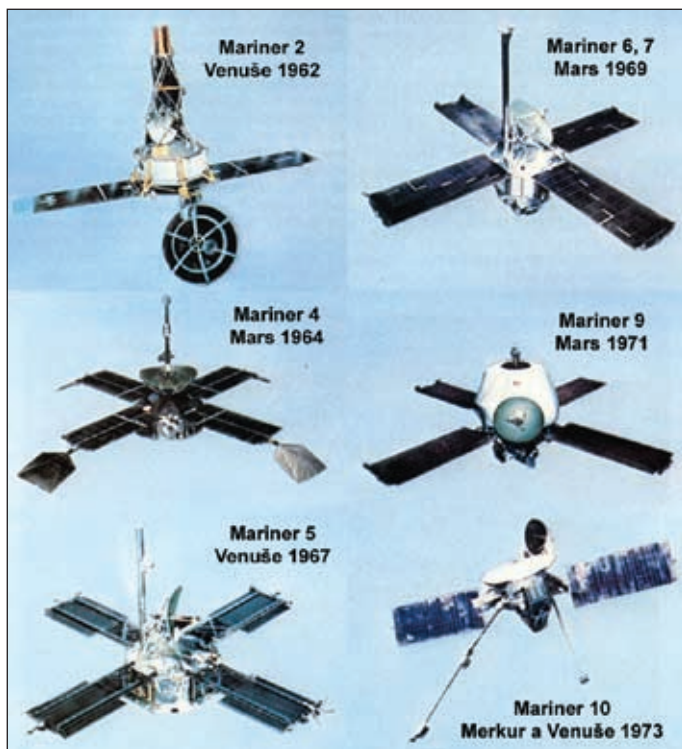
zapsaly do historie kosmických letů. Jako „nejdražší programátorská chyba světa“ byla dlouhou dobu označována chyba jednoho z pozdních Marinerů, kdy záměnou tečky za čárku v zápisu cyklu v jazyce FORTRAN (z něhož se program kompiloval pro programovatelný sekvencér družice) došlo ke ztrátě družice. V tomto případě byl na vině spěch (startovací okna jsou neúprosná) a nedostatečné otestování softwaru před samotným startem.

Další nechvalně proslulá chyba se stala osudnou sondě *Mars Climate Orbiter*, která shořela v atmosféře Marsu poté, co do ní vletěla pod příliš prudkým úhlem. Příčina spočívala v tom, že zatímco družice vesele měřila a předávala svou v pozici v anglických jednotkách (mílich), řídicí středisko naopak žilo v domněn, že dostává údaje v metrických jednotkách. Selhání v tomto případě padá na vinu zadavatele (JPL/NASA), který až příliš předpokládal, že systém je natolik všeobecně známý, že některé věci nemusí zdůrazňovat; předpoklad byl chybný.

Sonda *Mars Polar Lander* se ztratila a přesná příčina selhání není známa, nicméně vyšetřování ukázalo, že s jistotou pravděpodobností mohou být na vině systémy pro vysunutí nohou přistávacího modulu do přistávací polohy. Každá noha byla vybavena senzorem pro detekci dotyku s povrchem planety, po jehož indikaci se po několika milisekundách měly na kratičký okamžik zapnout brzdicí motory modulu. Software družice měl být připraven na možnost, že při vysunutí nohou senzory vysílaly falešný poplach – bohužel se při vyšetřování ukázalo, že ve skutečnosti software na falešný poplach nereagoval správně, a je tedy možné, že družice začala v průběhu sestupného manévru „přistávat“, což se jí stalo osudným.

Poslední perlička na závěr se týká stále činné družice SOHO, s níž pozemská střediska v létě roku 1998 ztratila jakýkoliv kontakt. Chyba nastala v samém závěru kalibrace gyroskopů, jejímž hlavním cílem bylo minimalizovat budoucí změny polohy družice a prodloužit životnost většiny přístrojů. Důsledkem kombinace chyb operačního střediska, softwaru a nepřesných telemetrických údajů se družice víceméně nekontrolovatelně roztočila v prostoru a rozumnou komunikaci se satelitem se podařilo obnovit až po čtyřech měsících.

Život počítačů v kosmu, jak je vidět, rozhodně není jednoduchý.



Po prvních pokusech v rámci programu Pioneer v polovině 60. let se NASA pustila do výroby větších a složitějších Marinerů. Z 10 kusů byly 3 ztraceny, ale zbytek dosáhl řady prvenství ve výzkumu vnitřních planet sluneční soustavy. Mariner 6 a 7, které přinesly první obrázky dnes známých geologických zajímavostí na Marsu, byly asi prvními sondami, které byly přeprogramovány za letu. Kromě toho, že během cesty k Marsu byla takto zvýšena přenosová rychlost komunikace na asi dvoutisícnásobek schopností Marineru 4, byla možnost na dálku měnit software klíčová pro záchranu celé mise Marineru 7. Při krátkém výpadku baterie totiž došlo k výpadku systému orientace kamer a k nalezení Marsu byla potřeba manuální kalibrace ze Země.



Jak je vidět ve srovnání s lidskými postavami, dnes již téměř desetiletá družice SOHO není žádný trpaslík. Ve vzdálenosti asi milionu kilometrů od Země je však zcela závislá na své řídicí elektronice. V červnu 1998 byla provedena rutinní kalibrace tří gyroskopů umožňujících sondě zjistit rychlost svého otáčení. Pro zvýšení životnosti byl gyroskop A zastaven. Těsně poté však byla provedena (také rutinní) stabilizace polohy sondy, která data z gyroskopů využívá. Příkaz k roztočení gyroskopu A však ze sekvence omylem vypadl – to, že gyroskop stojí, se ovšem řídicí systém nedozvěděl a od nuly, kterou z něj získával, proto automaticky odečetl kalibrační hodnotu. Tím získal údaj o fiktivní rotaci ve směru tohoto údaje a jeho pokusy o její (nemožné) vyrovnání vedly k nekontrolovatelnému roztočení sondy. Pozemní tým vyhodnotil problém jako chybu jiného gyroskopu, čímž sondu zbavil poslední možnosti autonomní záchrany. Přerušovaný signál rotující sondy byl poprvé zachycen až po více než dvou měsících.



Rychleji, levněji, lépe – série malých, rychlých a levných sond měla americkým daňovým poplatníkům ukázat, že vesmírný program je nemusí stát miliardy. Zatímco Mars Pathfinder (nahore) naprosto uspěl, dvojice Mars Polar Lander (vpravo) a Mars Climate Orbiter (vlevo na jeřábu během předstartovních testů) zcela selhala. Zatímco u obou těchto sond jsou na obrázcích jejich nevelké rozměry ve srovnání s technikou dobře patrné, Pathfinder vypadá dosti giganticky – to však jen díky nafouknutým přistávacím airbagům, které jeho konstruktéři právě zkoušeli.

