

Měření prostorové průchodnosti tratí

Klíčová slova: *diagnostika, fotogrammetrie, digitální, analogový, průchodnost, prostorový.*

1. Úvod

Jedním ze základních pojmů na styku činnosti DDC a DOP je **přechodnost kolejových vozidel**.

Kolejová vozidla jsou charakterizována:

- délkou vozidla nebo vozu,
- počtem a vzdáleností náprav,
- hmotností na konkrétní nápravu,
- hmotností na jednotku délky vozidla včetně nestlačených nárazníků,
- **svými rozměry** - u vozů včetně nákladu v rovině kolmé k ose koleje, tj. obrysem pro vozidla nebo ložnou mírou.

Konkrétní kolejové vozidlo je po trati přechodné tehdy, pokud jeho charakteristiky jsou v souladu s hlavními parametry tratí.

2. Vymezení základních pojmů

Pod pojmem hlavní parametry tratí se rozumí především tyto tři parametry:

- maximální úroveň smluvního svislého zatížení,
- **prostorová průchodnost tratě**,
- největší traťová rychlost nebo určená rychlost přepravy.

2.1 Průjezdny průřez a prostorové uspořádání

Definici průjezdného průřezu a prostorového uspořádání se sleduje, aby stavby, zařízení a jiné předměty nezasahovaly do dohodnutého průjezdného průřezu. Takto definovaný průjezdny průřez má tedy především význam stavební, tj. vymezuje polohu nově budovaných nebo přestavovaných staveb a zařízení po datu zavedení dohodnutého průjezdného průřezu do norem a předpisů. V červnu 1997 vstoupila v platnost ČSN 736320 Průjezdné průřezy na drahách celostátních, drahách regionálních a vlečkách normálního rozchodu. Při výpočtu průjezdných průřezů uvedených v této normě se vychází ze směrnic UIC a zásad kinematického chování vozidla. Nově je zaveden průjezdny průřez vycházející ze vztažného obrysu vozidla GB a GC. Zároveň byla pravidla kinematiky aplikována na obrys Pz. Z normy byl vypuštěn průjezdny průřez 1-SM. Průjezdné průřezy se potom dělí podle obrysu vozidla na základní, jmenovitý a mezní. Základní průjezdny průřez je

Ing. Roman Tomek, nar. 1965. Vzdělání: VŠDS v Žilině, obor stavební údržba a rekonstrukce dopravních staveb se zaměřením na železniční stavby. Současné zaměření činnosti: systémový inženýr - diagnostika železničního svršku, fotogrammetrie. Pracoviště: TÚDC S13 Hradec Králové.

Ing. Antonín Trubák, nar. 1953. Vzdělání: V roce 1977 absolvoval VUT FAST v Brně, obor geodézie a kartografie. Současné zaměření činnosti: vývojový pracovník v oblasti digitálních metod prostorové průchodnosti tratí ČD. Pracoviště: TÚDC Sekce tratí a budov Hradec Králové, Středisko pozemní fotogrammetrie Olomouc.

zkonstruován tak, že je neměnný od $r \geq 250$ m. Tam, kde tento průjezdný průřez nelze na trati aplikovat a to buď z důvodu menšího poloměru oblouku nebo stavby a zařízení zasahují do průjezdného průřezu, se počítá jmenovitý průjezdný průřez podle konkrétních parametrů koleje v daném místě. Tam, kde nevyhoví jmenovitý průjezdný průřez lze se svolením Drážního úřadu použít mezní průjezdný průřez. Mezní průjezdný průřez je stanoven na základě statistického vyhodnocení pravděpodobnosti současného výskytu jednotlivých přírážek.

2.2. *Prostorová průchodnost tratě*

Prostorovou průchodností tratě se rozumí bezpečný prostor pro průjezd vozidla o určitém obrysu / ložné míře / při největší traťové rychlosti nebo udané rychlosti přepravy.

2.3. *Měření překážek prostorové průchodnosti tratí u ČD*

Nejvíce jsou u ČD měřeny překážky pomocí kontaktních metod. Ruční měření pomocí metru a olovnice nebo měření pomocí obrysnice je zdoluhavé, neprůkazné a lze je použít jen lokálně. V současné době nejpoužívanější měřicí postupy vykazují systémové nedostatky, které jsou na úkor přesnosti. Další nevýhodou těchto postupů je, že od výšky cca. 2.5 m nad TK mohou být použity jen podmíněně. Na elektrifikovaných tratích v rozmezí bezpečného odstupů od trakčního vedení. Z nepohodlnosti postupu vyplývají velké nároky na pracovníky a čas.

Z výše jmenovaných důvodů bylo přistoupeno k vývoji zařízení na bezkontaktní měření překážek, které bylo určeno jen jako náhrada mechanické obrysnice na trasách pro přepravu komponentů jaderných elektráren. Toto zařízení - fotogrammetrický stroj FS-3 pracuje na principu jednosnímkové fotogrammetrie a bylo uvedeno do provozu v roce 1988. Útlumem jaderného programu vznikly snahy toto nákladné zařízení využít pro potřeby ČSD. Od roku 1991 se tímto strojem proměňují tratě v souvislosti s:

- kombinovanou dopravou,
- přepravou zásilek s překročením ložné míry,
- přípravou vybraných tratí na modernizace.

3. *Měření a vyhodnocování překážek do roku 1993*

Přístrojové vybavení a pracovní postupy odpovídaly své době, požadavkům uživatelů a finančním prostředkům uvolněným pro tuto agendu.

3.1 *Středisko pozemní fotogrammetrie*

V roce 1965 bylo zřízeno pod Geodetickou kanceláří Olomouc dnes SŽG pracoviště pro sledování průchodnosti železničních tunelů metodou světelných řezů, které bylo v roce 1988 rozšířeno o bezkontaktní diagnostiku prostorové průchodnosti tratí ČSD. V roce 1993 bylo Středisko pozemní fotogrammetrie (dále SPF) převedeno pod TÚDC sekci tratí a budov Hradec Králové. Toto pracoviště zajišťuje provoz stroje FS-3 a zabezpečuje laboratorní zpracování negativních snímků a jejich vyhodnocení.

3.2 *Matematický základ metody*

Pozemní fotogrammetrie je metoda pořizování a vyhodnocení grafických informací o objektech, v našem případě o překážkách, kde prostorový vztah mezi snímkem (centrální projekcí překážky) a skutečností (poloha překážky vztahovaná ke geometrické ose koleje) je matematicky dán tzv. podmínkou koliearity, tj. že bod na překážce, jemu odpovídající bod na měřicím snímku a projekční centrum (ohnisko měřického fotoaparátu), leží na jedné přímce. Podmínku koliearity vyjadřují rovnice :

$$x - x_0 = -c \frac{(X - X_0)r_{11} + (Y - Y_0)r_{21} + (Z - Z_0)r_{31}}{(X - X_0)r_{13} + (Y - Y_0)r_{23} + (Z - Z_0)r_{33}} = F(x)$$

$$y - y_0 = -c \frac{(X - X_0)r_{21} + (Y - Y_0)r_{22} + (Z - Z_0)r_{23}}{(X - X_0)r_{13} + (Y - Y_0)r_{23} + (Z - Z_0)r_{33}} = G(y)$$

kde x a y jsou snímkové souřadnice překážky, X a Y jsou souřadnice překážky vztažené ke geometrické ose koleje a parametry r_{ij} jsou transformační koeficienty. Souřadnice tzv. prvků vnitřní orientace měřického fotoaparátu, nutné pro přesný výpočet tj. polohy ohniska (c_k) měřického fotoaparátu a snímkové souřadnice středu snímku x_H , y_H , můžeme získat vyrovnáním pomocí metody nejmenších kvadrátů (odchyly od absolutně přesné polohy stanovené výrobcem jsou minimální). Linearizací výše uvedených kolinearity získáme rovnice oprav (pro bod i a snímek j):

Hodnoty rozdílů (oprav v_{ij}) jednotlivých souřadnic bodů překážky, získané linearizací výše uvedených rovnic kolinearity do formátu tzv. rovnic oprav jednotlivých souřadnic, jsou potom exaktně minimální, což zaručuje jejich maximální možnou teoretickou přesnost. Rovnice oprav pro bod i a snímek j vypadají následujícím způsobem:

$$v_{x_{ij}} = a_1 dx_{0j} + a_2 dc_j + a_3 d\omega_j + a_4 d\phi_j + a_5 d\kappa_j + a_6 dX_{0j} + a_7 dY_{0j} + a_8 dZ_{0j} + a_9 dX_i + a_{10} dY_i + a_{11} dZ_i + (x_{ij}^0 - x_{ij}^m)$$

$$v_{y_{ij}} = a_0 dy_{0j} + a_2 dc_j + a_3 d\omega_j + a_4 d\phi_j + a_5 d\kappa_j + a_6 dX_{0j} + a_7 dY_{0j} + a_8 dZ_{0j} + a_9 dX_i + a_{10} dY_i + a_{11} dZ_i + (y_{ij}^0 - y_{ij}^m)$$

Kde jednotlivé koeficienty a_i získáme jako parciální derivaci předchozích funkcí F a G . $a_1 = \frac{\partial F}{\partial x_0}$, atd.

V maticovém zápisu mají rovnice oprav tvar $\mathbf{v} = \mathbf{A} \mathbf{dx} + \mathbf{l}$. Za podmínky $\mathbf{v}^T \mathbf{v} = \min$, získáme normální rovnice $\mathbf{0} = \mathbf{A}^T \mathbf{A} \mathbf{dx} + \mathbf{A}^T \mathbf{l}$. Jejich řešením získáme neznámé prvky orientace polohy ohniska měřického fotoaparátu (projekčního centra) a vyrovnané teoreticky přesné souřadnice bodů překážky. Metoda umožňuje vyhodnocovat dva a více snímků současně, umožňuje kalibraci kamery v procesu vyhodnocení.

3.3. Pořizování - vyhodnocení dat - historie

Do roku 1993 byla u SPF Olomouc využívána semianalytická fotogrammetrická metoda, tj. primárním zdrojem informací o překážce byl negativ, pořizovaný fotogrammetrickým strojem FS-3 (viz obr 1) resp. měřickou komorou ZEISS UMK 10 / 1318, zpracovaný a digitalizovaný na analogovém překreslovači ZEISS OPTON SEG 6. Výsledkem byly souřadnice překážky v místním rovinném souřadnicovém systému, vztaženém ke geometrické ose koleje. Tyto souřadnice stejně jako údaje o GPK byly měřeny a registrovány ručně a zaváděny do databáze ASE (VÚŽ Líně-Sulkov). Videozáznam v systémech U-matic a VHS byl pořizován pouze pro lepší identifikaci překážek.

3.4. Nevýhody semianalytické fotogrammetrické metody:

Jednalo se o ekonomicky náročnou analogovou technologii, nepříliš účinné matematické nástroje pro vyhodnocení (překreslovač SEG 6 byl řízen osmibitovým počítačem HP 85), neexistovala žádná inteligentní vazba mezi grafickými a negrafickými daty, žádná kompatibilita s tvořícím se GIS ČD, velký podíl ruční práce při práci s daty, neproduktivní čas při negativním procesu. Polohová přesnost $m_{pol} = \pm 25 \text{ mm}$ byla ovlivněna zejména:

- excentricitou mobilního vlčovacího systému vzhledem ke geometrické ose koleje
- nestandardním snímáním prvků GPK (aparaturou VÚŽ Líně-Sulkov)



Obr. 1 Fotogrammetrický stroj FS-3

4. *Modernizace systému*

Negativní zkušenosti předchozí semianalytické metody a nástup výpočetní techniky vedly k modernizaci stávajícího systému měření, vyhodnocení a organizace grafických dat a k automatizované registraci informací o GPK.

4.1. *Požizování - vyhodnocení dat – současný stav*

Od roku 1994 je u SPF nasazena pro zpracování grafických dat semidigitální fotogrammetrická metoda, kdy je měřický snímek převeden do digitální formy přes scanner. Díky výkonné výpočetní technice je nasazen účinný matematický aparát pro vyhodnocení, a to do standardních počítačových formátů (TIF, DGN apod.) který posunul přesnost grafického

výstupu na již přijatelnou hodnotu $m_{pol} = \pm 15 \text{ mm}$ a stal se kompatibilním s datovými standardy používanými u ČD. Stále se ovšem jedná o rovinný (2D) výstup jehož kvalita je stále ještě ovlivněna převodem z analogového nosiče (filmu) do digitální formy.

Podstatným kvalitativním zlepšením fáze pořizování dat je automatické měření a registrace prvků GPK, které eliminací excentricity mobilního vřícovacího systému fotogrammetrického stroje FS 3 do standardního databázového souboru, vyvinuté pro FS-3 firmou KŽV Praha. Přesnost výstupu se tím opět zvýšila na současných $m_{pol} = \pm 8 \text{ mm}$, což je z hlediska běžných uživatelů dostačující.

5. *Teoretická přesnost prostorových souřadnic překážky*

Na konkrétním příkladu z testování digitální fotogrammetrické metody na fotogrammetrickém systému ČD FS-3 si ukážeme vliv použití různých druhů měřických fotoaparátů na přesnost v určení konkrétní polohy podrobného bodu překážky :

Jelikož konfigurace snímkových dvojic je podobná tzv. normálnímu případu, je možné odhadnout přesnost výsledných souřadnic pomocí Gaussova zákona o přenášení chyb.

(Normální případ znamená že osy záběru jsou rovnoběžné). Počátek souřadnicového systému je v levém projekčním centru, osa x směřuje na pravé projekční centrum, osa z k zenitu, osa y je ve směru snímkování. Střední souřadnicové chyby jsou popsány vzorci :

$$m_{X,Z}^2 = \left(\frac{x}{c} m_Y\right)^2 + \left(\frac{Y}{c} m_x\right)^2 + \left(\frac{Yx}{c^2} m_c\right)^2$$

$$m_Y^2 = \left(\frac{Y^2}{Bc} m_{px}\right)^2 + \left(\frac{Y}{B} m_B\right)^2 + \left(\frac{Y}{c^2} m_c\right)^2 \quad (1),$$

kde $m_c = 20\mu m$ (přesnost měření snímkových souřadnic), B (vzdálenost mezi kamerami) = 2500 mm, $m_B = 1mm$ (přesnost skutečné polohy měřického fotoaparátu) $Y = 11,4m$ (vzdálenost překážky od měřického fotoaparátu) pro podzim 1997, $Y = 7,2m$ pro jaro 1998. Teoretická přesnost byla vypočtena pro body vzdálené 2,5 a 5 m od osy koleje.

V rozsahu 0-5m lze očekávat většinu měřených bodů. Střední chyby vypočtené pro jednotlivé kamery jsou uvedeny v milimetrech v následující tabulce:

Tabulka 1 Střední chyby v poloze bodů vypočtené ze vzorců (1)

Kamera	$m_{X,Z(X=2.5m)}$	$m_{Y(X=2.5m)}$	$m_{X,Z(X=5m)}$	$m_{Y(X=5m)}$
Rollei 3003	4	14	7	14
Rollei 6006	4	13	6	13
Rollei Q16	2(4)	5(10)	3(7)	5(10)
ZEISS UMK	2	6	3	6
Video DVCAM	10	35	19	35

Legenda testovaných měřických fotoaparátů :

- Rollei 3003 analogový měřický fotoaparát formátu 36 x 24 mm, ohnisko 28 mm
- Rollei 6006 analogový měřický fotoaparát formátu 60 x 60 mm, ohnisko 40 mm
- Rollei Q 16 digitální měřická komora formátu 60x60 mm, rozlišení 4000 x 4000 DPI
- ZEISS UMK analogová měřická komora formátu 130 x 180 mm, ohnisko 100 mm
- Video DVCAM digitální videokamera, rozlišení cca 1300 DPI

Z uvedených testů je zřejmé, že přesnost požadovanou ČD DDC pro danou agendu lze dosáhnout jak analogovými fotoaparáty, tak i komorami digitálními a digitálními videokamerami, pokud splňují vstupní kritéria zejména v oblasti rozlišení na snímcích.

6. Vývoj mobilního digitálního diagnostického systému

Stále se zvyšující požadavky ČD na zvýšení kapacity, (viz následující tabulka) komplexnosti, kvality, kompatibility dat a na minimalizaci ruční práce při pořizování a vyhodnocování prostorové průchodnosti tratí vedly v roce 1996 k přípravě vývoje plně automatizované technologie diagnostiky prostorové průchodnosti tratí ČD.

6.1. Požadavky ČD DDC (Českých drah – divize dopravní cesty)

6.1.1. Kapacitní (viz tabulka 2):

(měření traťových, průběžných staničních + ostatních dopr. kolejí, mostů a tunelů)

Tabulka 2

Kategorie trati ČD	I. kat.	II. kat.	III. kat.	celkem	
• trať. + stan. + ost. dopr. kol. (km)	6 270		4 838	3 749	14 857
• z toho pro PLM (km)	5 616		2 297	162	8 074
• prostorové obj. - mosty (ks)	2 426	2 660	1 616		6 702
• - tunely (ks)	14	32	28		74
• nevyhov. obj. - mosty (ks)	22	29	17		68
• - tunely (ks)	0	10	12		22

- Zvýšit kapacitu systému na cca 8 000 km / rok (cca 32 000 objektů).
- Zajistit periodicitu měření a vyhodnocení min. v souladu s předpisem S 65:
 - 8 000 km tratí (priorita 1, tj. trati pro PLM) - 24 měsíců
 - 8 000 km tratí (priorita 2, tj. ostatní trati) - 48 měsíců
- Digitální archivace dat (5 let - tj. cca 100 000 objektů).

V předpisu S 65 uvedené intervaly měření jsou uvažovány pro měření ruční a to s ohledem:

- na časovou náročnost a pracnost měření a vyhodnocení včetně zavedení do databáze,
- na bezpečnost pracovníků provádějících měření a
- personální stav.

Ustřední registr mimořádných zásilek (URMIZA) požaduje trvale aktuální stav databáze překážek s co nejrychlejším zpracováním všech změn.

Z výše uvedených důvodů se předpokládá zkrácení intervalu měření na polovinu. Současně by se měly měřit i koleje u kterých byl proveden stavební zásah měnící její prostorovou polohu vůči objektům - překážkám.

6.1.2. Technologické:

- Zajistit stabilitu instalace technologií a nosného mobilního prostředku
- Plně automatizovat veškeré diagnostické technologie:
(Vyhledávání, měření 3D, vyhodnocení, organizace, archivace a aktualizace dat).
- Zajistit možnost tří stupňů přesnosti výstupních dat o překážce, a to :
 - vysoká** (3D deformace projektování na DTM) $m_{pol} = \pm 5 \text{ mm}$
 - standardní** (evidence DDC + prověřování PLM) $m_{pol} = \pm 15 \text{ mm}$
 - informativní** $m_{pol} = \pm 25 \text{ mm}$
- Zajistit prostorovou digitální informaci o objektu.
- Možnost využití videozáznamu pro fotogrammetrické vyhodnocení.
- Zajistit prostorovou digitální diagnostiku tunelů.

6.1.3. Organizační:

- Minimalizovat ruční měření a vyhodnocení objektů na cca 5% (bude se týkat jen změn jednotlivých samostatných objektů - překážek).
- Zajistit inteligentní a průběžný přenos dat PPT na uživatelské VJ (výkonné jednotky) ČD.

- Zajistit proporcionalitu všech technologických procesů na roční kapacitu cca 8 000 km (cca 32 000 objektů).
- Vytvořit předpoklad pro nasazení 3D dat PPT v otevřených, objektově orientovaných GISech.
- Stanovit optimální poměr cena - výkon systému resp. jednotlivých technologických komponent v ekonomickém prostředí ČD.

6.2. *Koncepce řešení*

Technologicky nejčistší řešení nabízejí komplexní mobilní diagnostické prostředky integrující digitální prostorové fotogrammetrické systémy, digitální videosystémy počínaje měřickými digitálními kamerami (foto i video) s vysokým rozlišením, s možností lokalizovat předmět měření v geodetickém systému pomocí GPS, provádět digitální diagnostiku tunelů z hlediska PPT a efektivně provádět správu, archivaci a organizaci těchto dat v informačním systému. Zpracování výsledků probíhá na digitální pracovní stanici. Tedy nekompromisní odklon od nestandardních a nekompatibilních produktů k již vyřešeným technologiím aplikovatelným v podmínkách ČD. Tímto směrem se ubírá další vývoj diagnostiky PPT u ČD. V současné době přicházejí v úvahu pro ČD následující technologické celky:

6.2.1 *Digitální fotogrammetrie*

- **ROLLEI METRIC** (průseková fotogrammetrie)

Jedná se metodu pořizování a zpracování digitálních měřických snímků v přesnosti požadované ČD bez možnosti přímého stereoskopického efektu.

- **IMAGE STATION SSK** (digitální stereofotogrammetrie)

Alternativní metoda vyhodnocování digitálních měřických snímků s možností přímého elektronického stereo pozorování prostorových objektů.

6.2.2. *Digitální videozáznam*

- **SONY DVCAM** (digitální videosystém s vysokým rozlišením)

Získání prostorové informace o objektu překážky lze s dostatečnou přesností pořídit v digitální formě s možností fotogrammetrického vyhodnocení s informativní přesností digitálními videokamerami s vysokým rozlišením cca 1300 DPI (např. SONY DVCAM typ DSR – 200 AP).

6.2.3. *Digitální diagnostika tunelů*

- **AMBERG - typ TS 360** (digitální mobilní scanner s vysokým rozlišením)

Jedná se o digitální rotační scanner na bázi rotačního laseru s rychlostí rotace od 2 500 do 5 000 ot./s, který je schopen pořídit prostorovou informaci o tunelové rouři jak z hlediska prostorové průchodnosti, tak i z hlediska stavebního (metoda termografie), a to s přesností cca. 20 mm.

- **Plasser & Theurer** (digitální mobilní scanner s vysokým rozlišením)

Jedná se o obdobný systém jako TS 360 ale bez použití termografie.

6.2.4. *Lokalizace překážek v geodetickém systému metodou GPS*

Informační systém ČD si v dohledné době vynutí lokalizaci objektů v geodetickém zobrazení. Z tohoto pohledu byly v roce 1998 na SPF Olomouc testovány tyto systémy:

- **LEICA - typ 200** (Švýcarský systém - VUT Brno ÚG)

Systém testovaný pro možné nasazení v podmínkách ČD vykazuje vysokou vnitřní polohovou stabilitu a přesnost (cca 1 až 3 mm), a je schopen pracovat v kinematickém režimu mobilního měřicího systému typu FS-3

- **ASHTECH – typ GG 24 RTK** (USA - ČD Pardubice)

Systém satelitní lokalizace překážek s vysokou vnitřní přesností a s možností lokalizovat polohu překážky s centimetrovou přesností v RTK módu (Real Time Kinematic). V současné době je tento systém testován na pracovišti ČD SZT LIS Pardubice a počítá se s jeho testováním též v souvislosti s digitální diagnostikou prostorové průchodnosti tratí.

7. Spolupráce se zahraničními firmami

Realizace mobilního diagnostického prostředku, která obsahuje výše uvedené technologie vyžaduje spolupráci se zahraničními firmami, které se zabývají uvedenou problematikou komplexně. V Evropě není mnoho firem, které uvedenou problematiku integrovaného diagnostického mobilního systému řeší komplexně. Jednou z nich je německá firma METRONOM, která vyvinula a vyrobila pro potřeby DB systém LIMEZ II integrující diagnostické technologie odpovídající potřebám ČD.

8. Závěr

Realizace nového mobilního diagnostického prostředku předpokládá koordinaci při vyladění výše uvedených technologických komponent tak, aby proces pořizování, vyhodnocování, archivace a hlavně efektivního využívání všech informací zcela zásadně ovlivnil rozhodovací procesy a ekonomickou efektivitu drážního provozu. Budoucnost vidím v technicko - ekonomicky přijatelné kombinaci digitálních popř. semidigitálních prostředků ve fázi snímání ve vazbě na digitální fotogrammetrickou pracovní stanici až po úplnou prostorovou informaci o objektu v reálném čase pomocí digitálního videa s možností připojení na geodetický systém přes GPS, připravenou fungovat v informačním systému DDC (MapInfo překážek) poř. v otevřeném, objektově organizovaném GIS ČD.

Časové horizonty těžko odhadnout, do jaké míry se naplní tyto záměry to závisí především na nutnosti vytvořit datovou základnu diagnostiky prostorové průchodnosti tratí ČD kompatibilní nejen s IS ČD, ale i s UIC v souvislosti s integračním evropským procesem.

V Hradci Králové, leden 1999

Lektoroval: Ing. Ladislav Horčíčka
ČD TÚDC Hradec Králové