

4.7. Snímkové triangulace

Snímkové triangulace umožňují určovat geodetické souřadnice bodů bodového pole metodami letecké fotogrammetrie. Podle *Návodu pro obnovu katastrálního operátu a převod* lze takto určovat body podrobného polohového bodového pole (PPBP). Fotogrammetrické zhušťování bodového pole je pro velká území ekonomicky výhodnější a rychlejší než geodetické zaměření. Touto metodou mohou být určovány *souřadnice vlíčovacích bodů* pro podrobné fotogrammetrické mapování.

Neznámými hodnotami jsou geodetické souřadnice **určovaných bodů** (nové body bodového pole nebo body vlícoavcí) zjišťované na základě známých souřadnic **výchozích bodů** (existující body základního polohového bodového pole (ZPBP), zhušťovací body (ZhB) a další body o známých geodetických souřadnicích splňující požadovanou přesnost). Výsledky snímkové triangulace se také používají pro určení prvků vnější orientace před podrobným fotogrammetrickým vyhodnocením nebo pro spojování snímků do bloků před tvorbou digitálního modelu terénu a digitálního ortofota.

Výchozí i určované se při zjišťování souřadnic bodů PPBP a vlíčovacích bodů pro mapování ve velkém měřítku uměle signalizují. Přitom pro určované body se krom středového signálu použijí pouze dvě vzájemně kolmá ramena a pro body výchozí tři ramena v úhlu 120° .

Pro snímkové triangulace lze využít snímků pořízených pro podrobné mapování nebo je použita **metoda dvojího náletu**, kdy se mapované území snímkuje podruhé s podélným překrytem 60% (získáme vhodnější základnový poměr) a případně také z vyšších letových hladin nebo s širším úhlem záběru (na snímku je pak zachyceno větší území).

A/ Radiální triangulace

používala se jen pro rovinná území před mapováním kombinovanou metodu (jednosnímková letecká fotogrammetrie); výsledkem je pouze poloha bodů – geodetické souřadnice **X, Y**; jako výchozí jsou nutné alespoň dva body o známých souřadnicích (vhodnější je větší počet); přesnost je dostačující pouze pro mapy středních a malých měřítek

K vyhodnocení radiální triangulace se používají tzv. **radiální body**, pro které je osnova směrů na snímku stejná jako měřená v terénu – jsou to body, na které do určité míry nepůsobí radiální posuny (nadir, fokální bod, hlavní bod, střed snímku, centrální bod).

Podle způsobu řešení radiální triangulace rozlišujeme tyto metody:

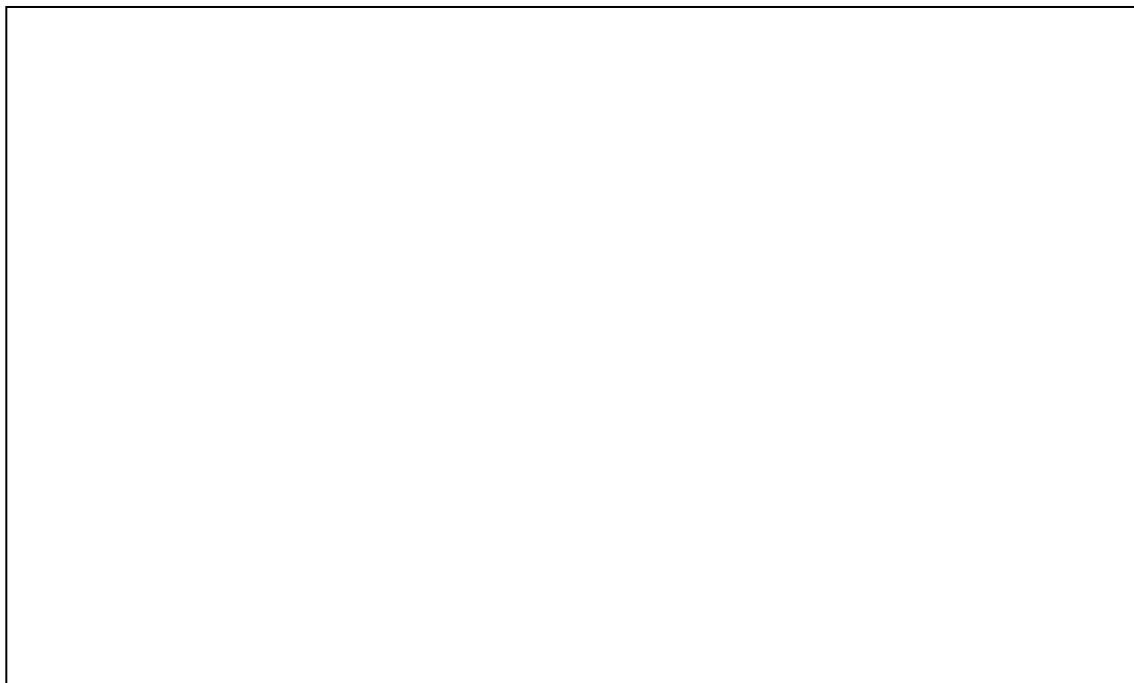
- **početní** – na snímcích měříme přímo osnovu směrů nebo snímkové souřadnice; z výchozích a radiálních bodů vytvoříme vetknutý polygonový pořad a nové body určujeme protínáním vpřed;
- **grafická** – na konstrukční list se zobrazenými výchozími body o známých souřadnicích umísťujeme průsvitky s vykreslenými směry na body známé i určované; poloha nových bodů se vypíchne v jejich průsečících;

- **mechanická** – na konstrukčním listu s proraženými otvory v místech výchozích bodů provedeme montáž na kovové čepy čtvercových šablon s vysekanými otvory v místech radiálních bodů a ovály ve směrech osnovy; následuje mechanické vyrovnání vzniklých odchylek; poloha nových bodů v průsečících směrů se vyznačí do podkladu skrz duté čepy pikýrovací jehlou.

V ČR se pro nízkou přesnost (do 1 mm v měřítku snímku) a výškovou členitost našeho území radiální triangulace využívala málo.

B/ Aerotriangulace

V každé snímkové řadě vznikne prostorový polygonový pořad tvořený středy vstupních pupil všech snímků. Spojením řad do bloku vzniká trigonometrická síť. Výsledkem aerotriangulace jsou prvky *vnější orientace každého snímku* a *geodetické souřadnice nově určených bodů X, Y, Z*.



➤ metody aerotriangulace

1. analogové aerotriangulace

prováděla se na *analogových strojích* (se symetrickým základnovým vozíkem a možností zkříženého pozorování snímků); u prvního snímku jsou požadovány 4 výchozí body a 2 u posledního v řadě; *poloha* nových bodů je zjištěna *graficky na připojeném kreslícím stole*, *výška* odečtena na *mechanickém počítadle*; určení se provádí pro každou snímkovou dvojici (stereoskopický model) samostatně nebo pro celou řadu snímků (metoda nezávislé dvojice – na počátku řady snímků, metoda připojení snímku – pro navazující snímky); přesnost určení polohy bodu se pohybuje kolem *0,1 mm* na konstrukčním listu mapy (tj. *1 m* pro měřítko *1:10 000*) – využití pouze pro mapování ve středních a malých měřítkách;

2. semianalytické aerotriangulace

na *analogových strojích* měříme a do připojeného počítače registrujeme modelové souřadnice výchozích i určovaných bodů; následuje *prostorová podobnostní transformace* do geodetického systému souřadnic; měření se provádí pro každou dvojici snímků (model) zvlášť; následně lze provést vyrovnání jedné řady nebo celého bloku snímků najednou; využití pro mapy středních měřítek;

3. analytické aerotriangulace (početní) – AAT

na přesném stereokomparátoru (nebo na analytickém stroji) měříme a do počítače registrujeme snímkové souřadnice výchozích i určovaných bodů (přesnost měření $1 \mu\text{m}$ s maximálním rozdílem dvojího měření $2 \mu\text{m}$); následuje *prostorová projektivní transformace* do geodetických souřadnic; nutné jsou alespoň 4 výchozí body pro celý blok snímků, vhodné jsou ale alespoň 3 body v každé řadě – podle *Návodu pro obnovu katastrálního operátu a převod* mají být výchozí body rozmístěné rovnoměrně na obvodu bloku ve vzdálenosti 2-3 základen a uvnitř bloku tak, aby bylo dosaženo hustoty alespoň 0,4 bodu na 1 snímkovou dvojici (tj. 2 body na každých 5 dvojic);¹ analytickou aerotriangulací určené body lze použít jako vlíčovací body i pro podrobné vyhodnocení map velkých měřítek; metoda se také využívá pro velmi přesné podrobné vyhodnocení na analytických strojích²

Do výpočtu vstupují známé prvky *vnitřní orientace*, přibližné hodnoty *prvků vnější orientace*, známé *geodetické souřadnice* výchozích bodů bodového pole a měřené *snímkové souřadnice* bodů výchozích i určovaných. Výsledkem jsou *přesné prvky vnější orientace* každého snímku a *geodetické souřadnice* určovaných bodů. Podle způsobu řešení výpočtu rozlišujeme tyto metody (viz také metody určení prvků vnější orientace dvousnímkové letecké fotogrammetrie):

- etapové řešení – s blokovým vyrovnáním

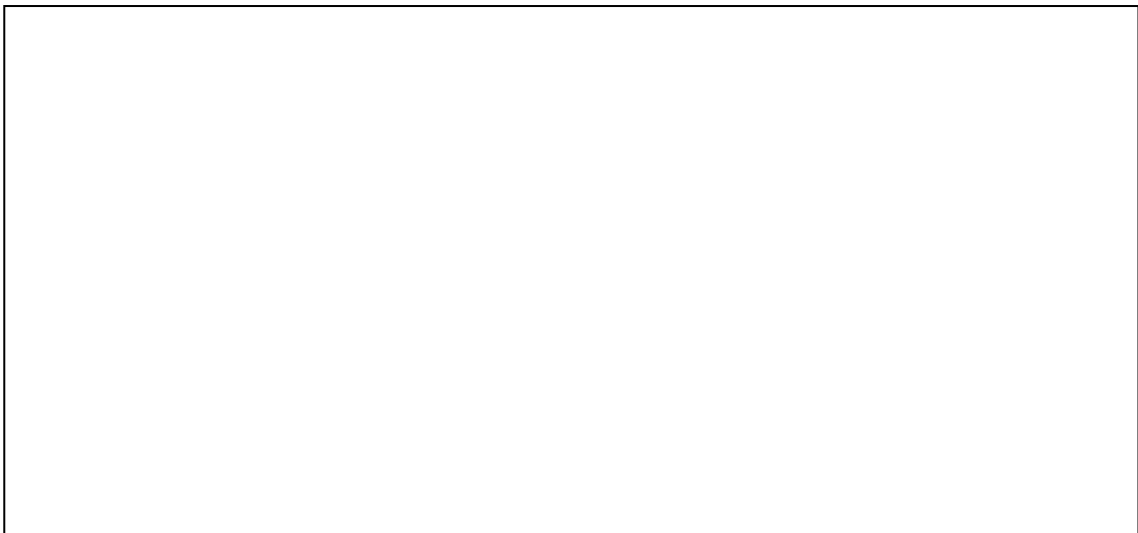
početní řešení provedené v jednotlivých krocích podobně jako u analogové aerotriangulace: připojujeme jednotlivé stereoskopické modely s vyrovnáním rozdílů na jejich stycích; vyrovnání může být prováděno v jednotlivých řadách nebo pro celý blok snímků (několik řad najednou) – tzv. **blokové vyrovnání**; potřebné jsou alespoň čtyři výchozí body (dva na začátku a dva na konci řady);

postup řešení: měření snímkových souřadnic, transformace do snímkových souřadnic prvního snímku pomocí rámových značek, relativní orientace (epipolární transformací na základě podmínky komplanarity – tj. připojení snímku), měřítkové připojení a absolutní orientace;

¹ Jestliže se analytickou aerotriangulací zjišťují i výšky určovaných bodů, mají být výškové výchozí body rozloženy na obvodu ve vzdálenosti 1-2 základen a uvnitř bloku s hustotou alespoň 0,8 bodu na 1 snímkovou dvojici (tj. 4 body na každých 5 dvojic).

² Pokud nebyly určované body uměle signalizovány (při mapování ve středním měřítku), bylo možné před vlastním měřením použít pro jejich vyhledání na analogovém snímku *Interpretoskop* a pro vyznačení polohy laserovým paprskem do citlivé vrstvy přístroj *Transmark*.

- **komplexní řešení** – s vyrovnáním paprskových svazků (*Bundle Adjustment*) poprvé použil r. 1958 *H. Schmid* pro zhuštění sítě bodů na Měsíci; *princip*: bod v terénu, střed promítání a obraz tohoto bodu na snímku musí ležet na jedné přímce, tj. na promítacím paprsku – pro celý blok snímků najednou se provádí **vyrovnání paprskových svazků** bez mezikroků (bez rozdělení na relativní a absolutní orientaci); řeší se pomocí přímého převodu snímkových souřadnic na geodetické, tj. projektivní prostorovou transformací; pro každý snímek máme určit 6 neznámých prvků vnější orientace (případně také prvky vnitřní orientace) a dále 3 neznámé souřadnice každého určovaného bodu; řešíme velké množství rovnic (až stovky tisíc); pro výpočet jsou nutné alespoň přibližné hodnoty prvků vnější orientace; rovnice se řeší postupným přibližováním k výsledku – tzv. iterací; získáme geodetické souřadnice určovaných bodů a prvky vnější orientace pro všechny snímky najednou;



- **komplexní řešení s podporou GNSS/IMU (GNSS/INS)** všechny prvky vnější orientace (poloha středu vstupní pupily X_0, Y_0, Z_0 a úhly κ, φ, ω) jsou během snímkového letu určovány s vysokou přesností pomocí přijímačů GNSS a inerciální měřící jednotky IMU (INS) – vnitřní přesnost měření GNSS je $0,05\text{ m}$ a určení polohy za letu spolu s měření inerciální jednotkou $0,2\text{ m}$; naměřené hodnoty vstupují do výpočtu jako přibližné, výpočet je stejný jako v předchozím případě, ale vede rychleji ke správnému výsledku; pro mapování ve středním měřítku lze snímkový let provádět i bez vlíčovacích bodů a zpracování snímků bez aerotriangulace, ale pro kontrolu a zvýšení přesnosti je vhodné v mapovaném území zajistit alespoň několik bodů o známých souřadnicích;

4. digitální aerotriangulace (automatická)

analytická aerotriangulace prováděná na digitálních nebo skenováním digitalizovaných snímcích v počítači (digitální fotogrammetrické stanici – DPW); při měření nepůsobí mechanická omezení přesnosti analytického stroje nebo stereokomparátoru ($1\ \mu\text{m}$); rozlišovací schopnost skeneru dosahuje až $3\ \mu\text{m}$ (velikost prvků CCD),

z důvodu narůstajícího objemu dat se letecké snímky digitalizují na velikost pixelu nejvýše $12 \mu\text{m}$; požadované centimetrové přesnosti v geodetických souřadnicích pak bývá docíleno subpixelovou transformací (odečítání polohy bodu na snímku na $0,05$ pixelu),

postup zpracování: načtení snímků a textových souborů se seznamy souřadnic rámových značek, prvků vnitřní orientace, geodetických souřadnic výchozích bodů a přibližných prvků vnější orientace, automatická vnitřní orientace (vyhledání rámových značek obrazovou korelací – porovnání se vzorem), dále systém navrhne polohu nových určovaných bodů s rozložením podle Gruberova schématu a dalších spojovacích bodů nebo vyhledá uměle signalizované vlíčovací body (opět porovnání se vzorem); většinou je nutné první tři body určit ručně nebo provést výběr z navržené skupiny bodů; následuje vlastní výpočet komplexního řešení aerotriangulace; přesnost určení nových bodů je $1-4 \mu\text{m}$ ve snímkových souřadnicích (např. pro $m_s = 2000$ to je méně než $0,01 \text{ m}$);