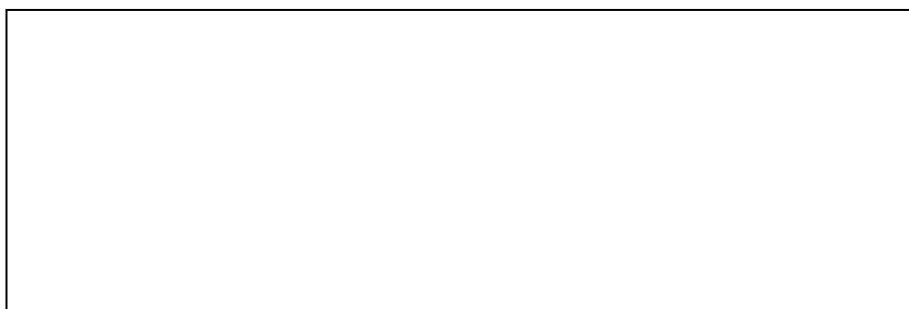


2 Základní pojmy a vztahy ve fotogrammetrii

2.1 Měřický snímek, vznik a vlastnosti – fotografické základy

Základem pro každé využití fotogrammetrie je měřický snímek, tj. snímek, který splňuje požadavky na kvalitu, přesnost a pro který známe *prvky vnitřní a vnější orientace* – je pořízen měřickou komorou. Ideální měřický snímek je *středovým průmětem* zobrazované skutečnosti (platí, pouze pokud opomeneme vady zobrazení objektivem, tj. odchylky od ideálního středového průmětu). Takto idealizovaný středový průmět ovšem nevytváří žádný reálný objektiv (viz kapitola 2.2).

Ve fotogrammetrii nejčastěji řešíme převod středového promítání snímku na pravoúhlý průmět mapy nebo plánu.¹



Středové promítání (lineární perspektiva) je definováno:

- *promítací vzdáleností*, tj. vzdáleností středu promítání od průmětny (pro měřické snímky a komory tuto vzdálenost nazýváme konstanta komory)
- *polohou průmětny k ose promítání*, předpokládáme kolmou rovinu snímku k ose záběru (pro měřické snímky osa záběru prochází snímkem v hlavním bodě, poblíž jeho středu)
- *deformacemi promítání*, tj. zkreslením (patří mezi vady zobrazení objektivem, největší význam má radiální distorze)

➤ Požadavky na kvalitu a přesnost snímku:

- *vysoká rozlišovací schopnost* (má zásadní vliv na výslednou přesnost)
- *rozměrová stálost* (závisí na velikosti srážky použitých podložek)
- *dostatečná a vhodná citlivost ke světlu* (nesmí vznikat podexponované nebo přeexponované snímky)
- *dobrá reakce na různé množství světla* odraženého od snímaných předmětů – tj. pružnost (světlé i tmavé plochy mají být dobře prokresleny)
- *dobrá reakce na světlo různé vlnové délky* (většinou v rámci viditelného záření)

¹ Na základě tohoto převodu se vytváří také digitální ortofoto, které vzniká ze snímků vytvořených středovým průmětem, ale samo již zobrazuje skutečnost v průmětu pravoúhlém.

Snímek bývá ve většině případů výrazně menšího měřítka, než má být pořizovaný plán nebo mapa, takže je porušena geodetická zásada postupu od velkého (měřítka) k malému – velikost předmětů se při fotogrammetrickém vyhodnocení mapy ze snímků zvětšuje. Proto jsou kladeny na měřický snímek vysoké nároky.

Měřické snímky dělíme podle způsobu záznamu obrazu na klasické fotografické snímky (analogové) a digitální snímky.

2.1.1 Klasický analogový fotografický snímek

Obraz vzniká **změnou chemického složení** citlivé (fotografické) vrstvy, která je způsobena energií dopadajícího záření během expozice (osvitu). Využívá se citlivosti některých halogenidů (halových solí) stříbra na světlo. Zachycený obraz nazýváme *latentní* (skrytý – není viditelný).

➤ Druhy fotografických materiálů:

- **negativ** – stranově i výškově převrácený obraz na průsvitných podložkách, má opačné barevné podání (tzv. komplementární, doplňkové barvy). Vzniká při expozici ve fotografické komoře (následuje jeho vyvolání). Při zvýšeném požadavku na přesnost provádíme měření přímo na negativu.
- **pozitiv** – stranově i výškově správný obraz, má správné barevné podání. Vzniká kopírováním negativu. Pro práce běžné přesnosti vyhotovujeme *pozitivní kontaktní kopie* na film (případně na sklo) nebo kontaktní kopie a *zvětšeniny* na papír (pouze pro dokumentační účely).
- **diapozitiv** – stranově i výškově převrácený obraz, má správné barevné podání. Vzniká při expozici na přímopozitivní (inverzní) materiály. Není vhodný pro vyhotovení kopií a zvětšenin.

➤ Složení fotografického materiálu:

1. Podložka – pevný, rozměrově stálý materiál, na němž je nanesena citlivá vrstva

a) **sklo** – nemá prakticky žádnou srážku, ale již se nepoužívá (jen výjimečně pro vědecké účely), nevýhodami jsou velká hmotnost a křehkost materiálu (obtížná manipulace), je nevhodné pro leteckou fotogrammetrii;

hlavní použití skleněných podložek $\Rightarrow$ *negativ*

b) **film** – dnes používanými filmovými materiály jsou *polyestery*,² např. PET – polyethylentereftalát (C_2H_4)_n – obtížně hoří a je téměř beze srážky, používá se v tloušťce 0,1-0,3 mm;

hlavní použití filmových podložek $\Rightarrow$ *negativ, pozitivní kontaktní kopie, diapozitiv*

c) **papír** – *polokarton* – pouze pro lesklé kontaktní kopie a zvětšeniny (nepravidelná srážka), *karton* – lze použít pro měření nižší přesnosti (pravidelná srážka), *zajištěný papír* (s vloženou hliníkovou folií) – používal se jako podklad pro tvorbu map (fotoplánů) překreslením snímku na překreslovačích;

hlavní použití papírových podložek $\Rightarrow$ *pozitiv, kontaktní kopie nebo zvětšenina*

² Dříve používané filmové materiály: *nitrocelulóza* (celuloid) – téměř beze srážky, ale snadno hoří, *acetylcelulóza* – nehoří, ale má velkou srážku, *triacetylcelulóza* – malá srážka, nehoří



2. **Citlivá vrstva (emulze)**³ – skládá se z *pojiva* (lepidlo dobře přijímající vodu – želatina, arabská klovatina), *látek citlivých na světlo* (halogenidy stříbra = halonové soli stříbra, nejčastěji bromid stříbrný AgBr) a dalších přídavných látek (aditiv): senzibilátory, barviva, stabilizátory, atd.
3. **Antihalační vrstva** je nanese na spodní straně průsvitných podložek, kde brání zpětnému odrazu paprsků při expozici a tím i rozostření obrazu. Při procesu vyvolání se v ustalovači rozpouští.

➤ **Vznik obrazu:**

a) **osvit** (expozice) – v místech dopadu světelných paprsků dochází vlivem jejich energie k rozštěpení bromidu stříbrného (na brom a stříbro) a vytvářejí se zde tzv. *zárodky vyvolání*, vzniká *latentní obraz* (není viditelný)

b) **vyvolání negativu** – provádí se bez přístupu světla (ve vývojnicích nebo vyvolávacích tancích) v lázni alkalické (zásadité) jemnozrnné *vývojky*, na osvětlených místech dochází k vylučování kovového stříbra (projevuje se černáním fotografické emulze), [5' až 10']⁴

c) **přerušeni** – rychle ukončí proces vyvolávání (neutralizuje vývojku) ve vodě nebo kyselém roztoku (např. kyseliny octové), takže obraz dále nečerná

d) **ustálení** – způsobuje znečitlivění fotografického materiálu ke světlu v kyselém ustalovači, rozpouští se neosvětlený bromid stříbrný, [10' až 20']⁵

e) **praní** – dochází k odplavení zbytků rozpuštěného bromidu stříbrného a dalších chemických látek z citlivé vrstvy tekoucí vodou, má zásadní vliv na trvanlivost obrazu, [cca 30']

f) **sušení** – skleněné desky a filmy necháme volně vykapat ve svislé poloze, pro urychlení je možné použít sušící skříně s proudícím nezahřátým vzduchem (při zvýšení teploty vzduch hrozí vznik srážky nebo dokonce rozpuštění želatiny)

⇒ vzniká **trvalý viditelný negativní obraz**

g) **kontaktní kopírování** (zachovává rozměry a měřítko snímku) nebo **zvětšování** (rozměry a měřítko snímku se zvětšují), provádí se osvit pozitivního materiálu (na skle, filmu nebo papíře)

³ Označení *emulze* není správné, protože citlivá vrstva obsahuje krystaly solí stříbra rozptýlené v roztoku želatiny (pevná látka v kapalině, nikoli kapalina v kapalině), jedná se tedy o *suspenzi*.

⁴ Doba vyvolání závisí na chemickém složení vývojky, na její teplotě a stáří (vyčerpání) vývojky.

⁵ Doba ustálení viz předchozí poznámka. Použité (vyčerpané) ustalovače obsahují značné množství stříbra – až 7g/l; odevzdávají se ve sběrnách.



h) **vyvolání pozitivu** – provádí se při tlumeném červeném nebo tmavozeleném světle, případně ve tmě (podle typu fotografického materiálu), [pro pozitivy na papíře max. 2' až 3']

i) **přerušení** – viz. bod c)

j) **ustálení** – viz. bod d)

k) **praní** – viz. bod e)

l) **sušení** – papírové kopie volně usychají na skle ve vodorovné poloze, sušičky a leštičky nelze použít pro měřické snímky, objevily by se velké srážky

⇒ vzniká **trvalý viditelný pozitivní obraz**

Proces vyvolání negativu a pozitivu je možné urychlit pomocí vyvolávacích automatů a elektrických kopírek.

➤ **Vlastnosti citlivé vrstvy:**

- a) obecná citlivost ke světlu
- b) citlivost k barvám
- c) gradace
- d) rozlišovací schopnost (jemnozrnnost)
- e) srážka

ad a) **obecná citlivost ke světlu**

Udává množství světla, které je potřebné k určitému stupni černání citlivé vrstvy.

V současné době se uvádí v mezinárodní stupnici ISO (*International Standards Organization*). Dříve se používaly také stupnice DIN (*Deutsche Industrie-Normen*, totožná s českou technickou normou ČSN), ASA (*American Standards Association*, totožná s ISO) nebo GOST (v bývalém SSSR). Obecně platí:

- Čím vyšší číslo stupnice, tím větší je citlivost materiálu.
- Čím větší citlivost, tím kratší expozice (osvit) je možné za stejných světelných podmínek volit.
- Čím horší jsou světelné podmínky (méně světla přichází z vnějšího prostředí do komory), tím je třeba volit vyšší citlivost materiálu nebo delší expozici je třeba volit.
- Čím větší citlivost, tím větší zrnitost částic v emulzi (zhoršuje se rozlišení).

Pro přibližný převod mezi starší stupnicí DIN (také ČSN) a současnou stupnicí ISO platí následující tabulka – výchozí hodnotou citlivosti je 21 DIN = 100 ISO.⁶

9 DIN = 6 ISO
15 DIN = 25 ISO
21 DIN = 100 ISO
24 DIN = 200 ISO
27 DIN = 400 ISO

ad b) citlivost k barvám

Druhy materiálů podle citlivosti k barvám:

- **černobílé snímky** – použité senzibilátory a barviva určují citlivost vrstvy k některé části spektra.
 - *nesenzibilovaný materiál* – citlivý jen k modré barvě (použití v reprografii)
 - *ortochromatický materiál* – nejcitlivější k modré, zelené a žluté; nereaguje na červenou (pro pozemní fotogrammetrii – převažují kratší vlnové délky),
 - *panchromatický materiál* – citlivý na celou část viditelného spektra (vhodný i pro leteckou fotogrammetrii – dobrá prostupnost dlouhovlnného záření atmosférou)

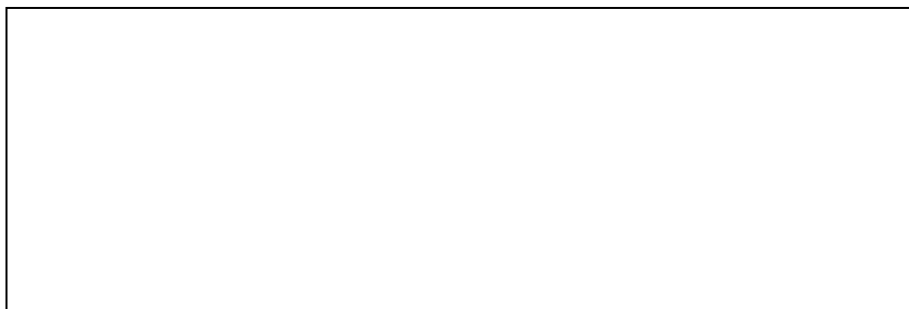
Lidské oko rozliší na černobílém snímku přibližně 16 odstínů šedi. Proto je méně vhodný pro interpretaci (čtení obsahu) snímku nebo zjišťování druhových a stavových veličin. Používá se v případech, kde je třeba určit pouze geometrické vztahy (tvar, velikost a polohu). Snímkování na černobílé materiály je levnější.

➤ barevné snímky

Mají několik uměle obarvených citlivých vrstev, které reagují na jednotlivé barevné složky záření (žlutá vrstva na modré světlo, purpurová vrstva na zelené světlo a azurová vrstva na červené světlo). Barevné vrstvy zároveň působí jako filtry, takže postupně pohlcují světlo kratších vlnových délek. Za první žlutou vrstvou je ještě vložen žlutý filtr, takže modré světlo se do dalších vrstev neodstává (na toto krátkovlnné záření totiž silně reagují všechny světlocitlivé látky).

Po vyvolání je výsledný obraz u negativního materiálu v *doplňkových (komplementárních) barvách*: červená (R - red) – azurová (C - cyan), zelená (G - green) – purpurová (M - magenta), modrá (B - blue) – žlutá (Y - yellow). Červená, zelená a modrá (RGB) jsou základní barvy, azurová, purpurová a žlutá (CMY) jsou k nim doplňkové (komplementární) barvy.

⁶ Stupnice DIN je logaritmická a stupnice ISO aritmetická. Proto zvýšením citlivosti o 3 stupně DIN získáváme dvojnásobnou citlivost ve stupnici ISO. Např. 21+3 = 24 DIN odpovídá 2 x 100 = 200 ISO.



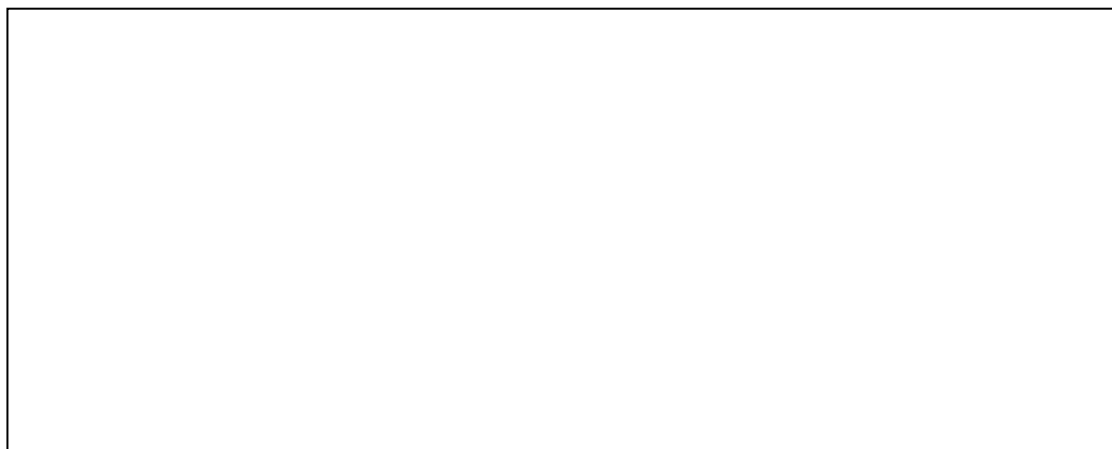
Barevné snímky používáme v případech, kde barva přináší novou informaci, to znamená při interpretaci snímků a zjišťování druhových a stavových veličin (např. zjišťování stavu lesních porostů, využití pro geologii, atd.). V letecké fotogrammetrii pořizování barevných snímků převažuje. Důvodem je především požadavek na tvorbu barevného ortofota.

➤ **infračervené snímky**

Zaznamenávají červenou a blízkou infračervenou část spektra (reagují také na tepelné vyzařování); výsledný *obraz je černobílý*. Využíváme dobré prostupnosti dlouhovlnného záření atmosférou. Používají se v pozemní i letecké fotogrammetrii pro snímkování v prostředích se sníženou viditelností (např. průmyslové oblasti zasažené smogem, při přízemní mlze nebo oblačnosti), pro sledování úniků tepla nebo objektů s hrozbou samovznícení (protipožární ochrana), pro sledování stavu porostů (projev se množství zeleni listové – chlorofylu) a v meteorologii.

➤ **spektrozonální snímky (*False colour*)**

Obraz je tvořen dvěma uměle obarvenými vrstvami (modrými a červenými pigmenty): panchromatická a infračervená vrstva. Vznikají tzv. *nepravé (falešné) barvy*, které neodpovídají barvám skutečným. Materiál původně vznikl pro účely špionáže (vyhledání maskovaných objektů) a dnes se používá především pro zjišťování stavu zelených porostů.⁷



⁷ Kombinací panchromatického a infračerveného digitálního snímku je možné vytvořit barevnou syntézu ve stejných odstínech.

Filtry (barevné nebo šedé – neutrální) jsou planparalelní skleněné destičky, které mají zvyšovat kvalitu obrazu především černobílých snímků. Umísťují se před objektiv komory. Barevné filtry mění spektrální složení světla pronikajícího do komory, neutrální filtry snižují jeho intenzitu (prodlužují dobu osvitů). Světlo shodné barvy s barvou filtru je na snímku zdůrazněno, světlo barvy doplňkové je naopak potlačeno, protože filtrem neprochází. Při použití jakéhokoli filtru musíme úměrně prodloužit dobu osvitů (koeficient udává výrobce).

V pozemní fotogrammetrii používáme žluté a žlutozelené filtry. Černobílou fotografii tak přizpůsobíme vnímání barev lidského oka, které je nejcitlivější na oblast žlutozelené barvy (kolem 560 nm) a zvýšíme kontrast snímku (omezí se zeslabování stínů modrým zářením oblohy).

V letecké fotogrammetrii používáme oranžové filtry, takže je zvýrazněno dlouhovlnné záření, které nejlépe proniká atmosférou.

Při infračerveném snímkování používáme tmavě červené až černé filtry, takže do komory neprochází žádné krátkovlnné záření, proniká pouze světlo červené a infračervené.

ad c) **gradace** (strmost – odstupňování kontrastů, expoziční pružnost)

Určuje závislost optické hustoty (černání obrazu) na expozici. Vyjadřuje se pomocí *gradační křivky* (též senzimetrická nebo charakteristická křivka).



Snímek má v ideálním případě na množství dopadajícího světla reagovat lineárně. Přímková (lineární) část křivky je *oblastí správných (normálních) expozic*. Při kratším (nedostatečném) osvitě dochází k podexponování snímku – na křivce vymezuje *oblast podexpozice*. Při delším (nadměrném) osvitě dochází k přexponování – na křivce vymezuje *oblast přexpozice*. Na konci této oblasti dosahuje černání svého vrcholu a pak se křivka obrací, klesá v oblasti *solarizace*, při které se optická hustota opět zmenšuje (dlouho trvajícím osvitěm jsou odbourávány zárodky vyvolání). Negativní obraz se stává inverzním a barevné podání je shodné s pozitivem. Tohoto jevu se využívá u přímopozitivních

(inverzních) materiálů, tj. diapozitivů. Křivka začíná na úrovni, která odpovídá stupni černání neosvětleného materiálu – toto zašednutí snímku se nazývá *závoj* a má být minimální (může být způsoben dlouhotrvajícím nebo nevhodným skladováním fotografického materiálu).

Velikost *gradace* γ je dána tangentou úhlu α , který svírá prodloužení přímkové části přímky s osou expozice.⁸ Podle velikosti gradačního čísla rozlišujeme tyto druhy fotografických materiálů:

- *měkký* $\alpha < 45^\circ$ $\text{tg } \alpha < 1$,
méně kontrastní, široká škála odstínů šedi, velká expoziční šíře, vhodný pro kopírování příliš kontrastních negativů, používá se v pozemní fot.
- *normální* $\alpha = 45^\circ$ $\text{tg } \alpha = 1$,
standardní využití, pro kopírování negativů s normálním kontrastem
- *tvrď* $\alpha > 45^\circ$ $\text{tg } \alpha > 1$,
výrazný kontrast, omezená škála odstínů šedi, malá expoziční šíře, vhodný pro kopírování málo kontrastních negativů nebo reprodukci černé kresby na bílém podkladu, používá se v letecké fotogrammetrii

ad d) **rozlišovací schopnost** (jemnozrnnost)

Závisí na velikosti zrna citlivé složky vyvolaného snímku a je udávána *počtem rozlišitelných čar na milimetr* (‘/mm). Rozlišovací schopnost běžných fotografických materiálů se pohybuje mezi 50 až 150 ‘/mm; s průměrnou hodnotou 100 ‘/mm.

Zjišťuje se kopírováním skleněné destičky s vyrytými vzorníky čar různé šíře a hustoty (velikost mezer je shodná se šířkou čar) na testovaný fotografický materiál – poslední skupina oddělených mezer a čar (dobře rozlišitelných) na vyvolaném snímku určuje rozlišovací schopnost materiálu.⁹



Rozlišovací schopnost snímku závisí mimo jiné na citlivosti zvoleného materiálu a na použité vývojce (snímky s vyšší citlivostí ke světlu mají hrubší zrna ve vrstvě a naopak). Protože rozlišovací schopnost zásadním způsobem ovlivňuje přesnost, se kterou je možné provádět měření na snímku (je třeba rozlišit co nejjemnější detaily), požadujeme ve fotogrammetrii vysoce jemnozrnné materiály s vysokým rozlišením (přibližně 100‘/mm) a používáme jemnozrnně pracující vývojky.¹⁰

⁸ Vyjadřuje strmost přímkové části senzimetrické křivky pomocí směrnice této přímky.

⁹ Kromě čárových se používají i kruhové testy.

¹⁰ Výsledné rozlišení snímku závisí do značné míry i na rozlišovací schopnosti objektivu, která může být i menší než rozlišovací schopnost snímku.

ad e) srážka

Je způsobena především mokrým procesem vyvolávání a následným sušením snímku. Její výskyt a velikost závisí na použité podložce, ale srážet se může i citlivá vrstva, která při vyvolání a následném praní silně nabobtnává.

Ve fotogrammetrii rozlišujeme tyto druhy srážky snímku:

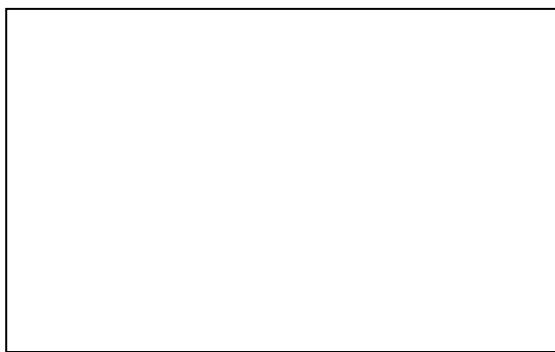
- *pravidelná* – působí ve všech směrech stejnou měrou, lze ji snadno změřit a odstranit podobnostní transformací nebo úměrným zkrácením velikosti konstanty komory při vyhodnocení;¹¹
- *diferenční* – projevuje se rozdílnou velikostí srážky ve dvou vzájemně kolmých směrech (vodorovném a svislém), odstraní se afinní transformací;
- *nepravidelná* – způsobuje místní deformace, které se nedají snadno zjistit a tudíž ani zcela odstranit, proto by neměla pokud možno nastat.

Vliv srážek můžeme omezit také tak, že pro měření používáme buď přímo originální negativ (případně diapozitiv) nebo jeho kontaktní kopii na film nebo skleněnou desku.

Kopie a zvětšeniny na papír používáme jen pro dokumentační účely, interpretaci (čtení) obsahu snímku nebo dříve také při překreslování snímku na papír zajištěný hliníkovou folií.

➤ Rozměry fotografických materiálů

- a) *pro pozemní fotogrammetrii*: listový (plochý) film nebo skleněné fotografické desky obdélníkového formátu založené ve světlotěsných kazetách, pořizují se jednotlivé snímky, výjimečně lze snímkovat i na filmové pásy (svitkový film)



- standardní rozměry snímku jsou: **13x18 cm** a někdy se používá též 9x12 cm

Kinofilm (políčko snímku 24x36 mm) se používá jen pro práce nižší přesnosti a na krátké vzdálenosti.

¹¹ Srážku snímku zjišťujeme a odstraníme proměřením rámových značek a transformací snímku na jejich známou polohu – tento postup se používá především u snímků digitalizovaných skenováním.

- b) *pro leteckou fotogrammetrii*: filmový pás v rolích se čtvercovým formátem snímků



- standardní rozměry snímku jsou:
 18 x 18 cm (šířka pásu 20 cm),
23 x 23 cm, tj. 9" x 9" (šířka pásu 25 cm),
 30 x 30 cm (šířka pásu 32 cm).¹²

Délka filmového pásu může být: 7,5, 15, 30, 60 nebo 120 m. Na poslední lze pořídit až 480 snímků.

Snímky na skleněné desky se v letecké fotogrammetrii pořizují jen zcela výjimečně, pro vědecké účely s vysokými požadavky na přesnost.

➤ Přehled použití různých druhů fotografických materiálů

	<i>materiál</i>	<i>citlivost</i>	<i>expozice</i>	<i>gradace</i>	<i>λ</i>	<i>filtr</i>	<i>formát</i>
pozemní fot.	ortochrom.	6 – 80 ISO	dlouhá	$\gamma < 1$	krátké	žluto-zelený	jednotlivé s.
letecká fot.	panchrom.	25 – 600 ISO	krátká	$\gamma > 1$	dlouhé	oranžový	filmový pás

¹² Formát 18 x 18 cm byl používán v ČR ještě v 60. a 80. letech 20. století. Od 80. let se stal běžný formát 23 x 23 cm. Formát 30 x 30 cm nebyl v ČR používán.

2.1.2 Digitální snímek

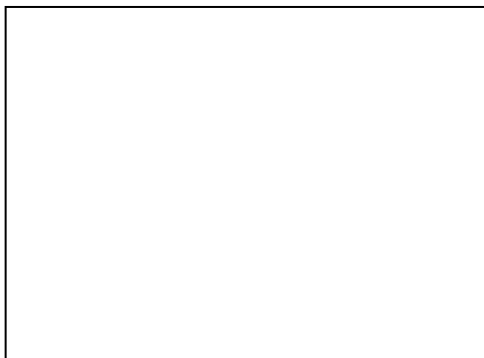
➤ Historický přehled

- 1950 – v návaznosti na rozvoj elektroniky vzniká *teorie digitálního obrazu*, její praktické využití však bylo znemožněno nedostatečnou kapacitou a rychlostí tehdejších počítačů
- 1969 – vynález prvků CCD v Bellových laboratořích (USA)
- 1970 – sestavena první digitální kamera
- 70. léta – po prvních kosmických letech přichází rozvoj digitálních technologií pro pořizování digitálních obrazových dat (nejprve vojenské a poté i civilní družicové systémy pro DPZ s mechanickými a později elektronickými skenery)
- 80. léta – vstup osobních počítačů (PC – Personal Computer) na trh způsobuje další rozšíření digitální technologie
- 90. léta – na trhu se objevily první digitální fotoaparáty
- po r. 2000 – masové rozšíření digitální fotografie a postupné převládání digitálního snímkování i v oblasti fotogrammetrie

➤ Definice a vlastnosti digitálního obrazu

Digitální snímek je obrazová informace převedená do číslicové formy.

Dopadající záření (absorbovaná energie) mění elektrické vlastnosti čidla (detektoru) – např. elektrický náboj (Q), odpor (R) nebo vodivost (G), při změně jedné veličiny dochází i ke změně ostatních.



➤ Výhody:

- při expozici v komoře vzniká primární digitální obraz – získáváme přímo digitální data
- možnost okamžitého zhodnocení kvality snímku
- vysoká citlivost CCD prvků ke světlu umožňuje velmi krátké expozice (až 1/8000 s)
- lepší radiometrické rozlišení snímku (větší barevná hloubka)
- stálost rozměru obrazu, jeho plnohodnotné kopírování a archivace
- nižší provozní náklady
- ekologická nezávadnost během provozu

➤ **Nevýhody:**

- vzniká velký objem dat
- problém s výrobou velkých přesně uspořádaných matic čidel (senzorů)¹³
- velká spotřeba elektrické energie prvků CCD

➤ **Základní pojmy**

- *pixel* (picture element), obrazový bod – základní a nejmenší jednotka digitálního obrazu; má určitou číselnou hodnotu (která vyjadřuje jeho barvu) a souřadnice (číslo řádku a sloupce v matici; číslováno od nuly s počátkem v levém horním rohu)
- *obrazová funkce* – udává vztah mezi souřadnicemi pixelu a jeho číselnou hodnotou; pro každý pixel vyhledá podle polohy v obraze jeho barvu; je to funkce nespojitá (diskrétní)
- *kódování obrazu* – způsob zápisu digitální obrazové informace; podle počtu bitů potřebných na vyjádření barvy jednoho pixelu rozlišujeme 1bitové, 8bitové a 24bitové kódování obrazu (tato tři jsou nejpoužívanější); zvolné kódování má zásadní vliv na celkovou velikost obrazového souboru¹⁴
- *barevná hloubka* – udává maximální počet barev v obraze, tj. maximální počet různých číselných hodnot vyjádřených pomocí určitého počtu bitů; závisí na zvoleném kódování a barevném systému¹⁵
- *barevný systém RGB* – pro vyjádření úrovně každé ze tří základních barev (R-red, červená, G-green, zelená, B-blue, modrá) je použito 8-bitové kódování, barva jednoho pixelu je tedy zapsána celkem 24 bity; získáváme tzv. pravé barvy (True Colour)¹⁶; systém RGB se nejvíce používá v digitální fotografii a pro zobrazování na počítačích¹⁷
- *vícépásmový obraz* (multispektrální) – vzniká, pokud pořizujeme obrazové záznamy ve více spektrálních pásmech (tj. v různých částech spektra), také mimo viditelné záření (především v oblasti záření dlouhovlnného: infračervené a mikrovlnné)
- *rozlišení digitálního obrazu* – nejčastěji se uvádí v *DPI* (Dots per Inch), počet obrazových bodů (pixelů) na délku jednoho palce ($1'' = 25,4 \text{ mm}$); u skenerů se rozlišení udává také velikostí jednoho čidla v řádce v μm ; pro obrazové záznamy DPZ (dálkového průzkumu Země), rozlišení leteckých snímků nebo ortofota se uvádí velikost jednoho pixelu ve skutečnosti (např. 1 pixel odpovídá na zemském povrchu ploše 10 x 10 m) – označuje se zkratkou GDS (*Ground Sample Distance*)

¹³ Uspořádání jednotlivých čidel (detektorů) do řádek a sloupců (tj. do matice) nazýváme snímač (senzor) nebo také čip. Stejně uspořádání do matice potom mají i pixely pořízeného digitálního obrazu.

¹⁴ Pokud vynásobíme počet všech pixelů v obraze počtem bitů potřebných pro vyjádření barvy jednoho pixelu, získáváme velikost nekomprimovaného obrazového souboru.

¹⁵ Zvolnému kódování odpovídá barevná hloubka obrazu: 1 bit → max. 2 barvy, 8 bitů → max. 256 barev, 24 bitů → více než 16 milionů barev (16 777 216).

¹⁶ V DPZ se používá v rámci viditelné části spektra snímání ve třech samostatných pásmech (R,G,B) a barevný obraz vzniká jako syntéza těchto pásem.

¹⁷ Dalším barevným systémem je např. CMYK; používá se ve čtyřbarvotisku (barvy C-cyan, azurová, M-magenta, purpurová a Y-yellow, žlutá jsou doplňkové k barvám základním a K-black slouží pro tisk sytých černých barev); barevný gamut (rozsah všech barevných odstínů, které lze v systému vyjádřit) je v CMYK menší než v RGB.

➤ **Obrazové formáty**

Obrazových formátů (tj. datových formátů určených pro uložení obrazových rastrových dat) je velké množství. Běžně používaných je ale jen několik:¹⁸

- BMP – *Windows Bitmap*
- PNG – *Portable Network Graphic*
- GIF – *Graphics Interchange Format*
- JPEG (JPG) – *Joint Photographic Experts Group*
- TIFF – *Tagged Image File Format*

➤ **Komprese (komprimace) obrazových dat**

- *bez komprese* – není použit žádný kompresní algoritmus, objem dat zůstává stejný (odpovídá počtu pixelů v obraze a použitému kódování)
- *neztrátová (bezztrátová) komprese* – zmenšením objemu dat se z obrazu neztrácí žádná informace; po dekompresi dostáváme naprosto stejná data
- *ztrátová komprese* – při zmenšení objemu dat dochází ke ztrátě informace (např. zjednodušení informace o intenzitě barev); v obraze se provedou neodstranitelné změny, po dekompresi nezískáme původní data

Kompresní poměr je poměr objemu dat komprimovaného a nekomprimovaného obrazového souboru – udává míru zmenšení množství dat.¹⁹

formát (přípona souboru)	kódování (standardní nastavení)	barevná hloubka (max. počet barev)	komprese
BMP	24 bitů	max. 16 777 216	bez komprese
PNG	24 bitů	max. 16 777 216	bezztrátová
GIF	8 bitů	max. 256	bezztrátová
JPEG	24 bitů	max. 16 777 216	ztrátová
TIFF	všechny možnosti	viz. kódování	všechny možnosti

Formát **BMP** se nepoužívá pro obrazy větších rozměrů. Objemy dat bez komprese, při zachování plné barevnosti, totiž mohou být obrovské. Formát **PNG** umožňuje ukládat plně barevné obrazy, ale často se používá i s menším počtem barev, kdy jeho neztrátová komprese dává nejlepší výsledky. Formát **GIF** se používá pro obrazy s omezenou barevností nebo pro černobílé obrazy (max. 256 barev nebo stupňů šedi). Formát **JPEG (JPG)** je nejrozšířenější pro ukládání fotografických snímků; umožňuje plnou barevnost a poměrně malý datový objem. Vzhledem ke ztrátové kompresi ale není vhodný pro uložení čárové kresby (např. map nebo textů), tj. obrazů s prudkými barevnými přechody (barevnými hranami) nebo velkých obrazů s malým počtem barev. Formát **TIFF** poskytuje velké množství voleb (počet barev, kompresní algoritmus), takže jeho správné použití závisí na vhodném nastavení. Využívá se pro přenos dat mezi různými softwary.

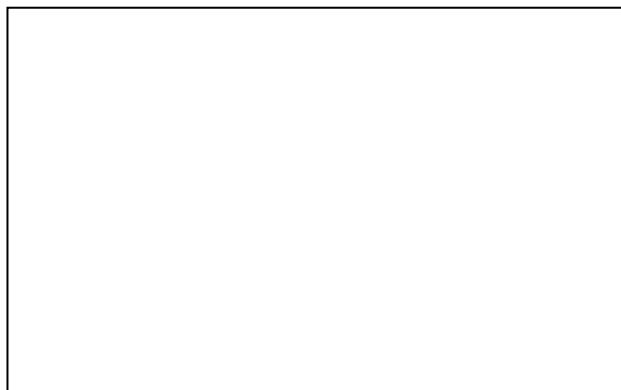
¹⁸ Pro zjednodušení je v textu uvedeno označení obrazového formátu shodné s koncovkou (příponou) obrazového datového souboru.

¹⁹ Pro některé formáty lze ve specializovaných softwarech velikost kompresního poměru nastavit.

➤ Vznik digitálního obrazu

Převod obrazové informace do číslíkové formy nazýváme *digitalizace obrazu*. Využívá se procesu tzv. *vzorkování*, kdy jsou ve zvolené periodě odečtu (vzorkovacím kmitočtu) měřeny hodnoty analogového signálu pomocí A/D převodníku (Analog To Digital).²⁰

V případě digitalizace obrazu je odečítána intenzita záření dopadajícího na čidlo a perioda odečtu je nahrazena rozlišením snímku (množství naměřených hodnot je dáno počtem všech čidel ve snímači – senzoru).



vstup: analogový signál $\Rightarrow$ vzorkování (A/D převodník) $\Rightarrow$ digitální výstup

➤ Čidla (detektory)

Oproti klasické fotografii jsou záznam a uložení obrazu dva oddělené procesy. Všechna zde uvedená čidla patří mezi křemíkové fotodiody:

- **CCD** prvky (Charge Coupled Device – “zařízení se sdruženými náboji”) jsou polovodičové křemíkové prvky, reagující na záření vlnových délek 200 až 1100 nm změnou elektrického odporu. Jejich citlivost k barvám (tzn. k různým vlnovým délkám) musí být upravena pomocí filtrů tak, aby reagovali pouze na oblast viditelného spektra (380 – 720 nm). Při expozici na čidlech vzniká elektrický náboj, který je následně přenesen do registru, v podobě analogového signálu zesílen, následně digitalizován a uložen.²¹
- **CMOS** (Complementary Metal Oxide Semiconductor) pracuje na bázi tranzistoru; oproti CCD má výrazně nižší spotřebu elektrické energie (1%), je menší a výroba levnější (o 80%), může mít ale nižší a nestejnoměrnou citlivost (obecnou i k barvám).²²
- **fotočlánek** – je polovodič jako CCD, ale mnohem větší (nevytváří matice prvků); používá se v bubnových (laboratorních) a družicových skenerech, a také pro výrobu elektrické energie v solárních panelech.

²⁰ Podobný proces vzorkování se používá při digitalizaci nejrozličnějších analogových signálů (např. zvukových).

²¹ Předávání sdružených nábojů mezi čidly až do registru je využíváno u čipů s tzv. progresivním skenem.

²² U pasivních CMOS je dalším problémem vysoký šum – používají se v levnějších fotoaparátech. U aktivních CMOS je ke každému čidlu připojen obvod redukující šum – dosahují pak vysoké kvality obrazu.

➤ **srovnání** klasického analogového a digitálního fotografického snímku:

- Jestliže uvažujeme fotografický materiál s průměrným rozlišením $100'/mm$ a na zobrazení jedné rozlišitelné čáry v digitálním obraze je třeba dvou sousedních pixelů (čára a mezera), potom velikost takového pixelu vypočteme $1\text{ mm} / 2 \cdot 100 = 0,005\text{ mm} = 5\text{ }\mu\text{m}$. Přitom běžná velikost prvků CCD se pohybuje v rozmezí $3\text{--}10\text{ }\mu\text{m}$.
- Zásadním problémem je přesné sestavení velkých matic prvků CCD (uspořádání do řádek a sloupců a jejich správná orientace) nebo také současné odečtení a rychlé uložení velkého množství pořízených dat.²³ Extrémně velké matice prvků CCD je technologicky velice náročné sestavit.²⁴
- Jestliže použijeme skenování analogového snímku s nejvyšším rozlišením (tzv. na zrno, $150'/mm$, tj. 1 prvek CCD = $3\text{ }\mu\text{m}$), dostáváme výpočtem hodnotu rozlišení $25,4\text{ mm} / 0,003\text{ mm} = 8460\text{ DPI}$. Takto vysoká rozlišení se ale pro skenování snímků nepoužívají – vznikaly by příliš velké datové objemy.

Příklad: Pro letecký snímek formátu $23 \times 23\text{ cm}$ vznikne při skenování s velikostí jednoho prvku CCD $10\text{ }\mu\text{m}$ (tzn. 2540 DPI) 529 milionů pixelů, a to při 8bitovém kódování u černobílého obrazu (256 stupňů šedi) představuje 500 MB obrazových dat bez komprese. Pokud bychom použili skenování na zrno (8460 DPI) vzniklo by 5600 MB dat – nepoužívá se.

Podle zvoleného zařízení pro pořízení digitálních obrazových dat a způsobu jeho použití rozlišujeme digitalizaci primární a sekundární:

➤ **primární** (prvotní) **digitalizace**

Výhodou je vznik přímo digitálního obrazu při expozici v komoře. Používají se fotogrammetrické digitální komory: měřické, semiměřické a neměřické.

V *pozemní fotogrammetrii* je možné u digitálních *měřických komor*, v případě že se stanovisko ani objekty nepohybují, použít snímání obrazu pohybující se řádkou nebo maticí prvků CCD (tzv. Macro-scanning). Výsledná velikost snímku může být až 11.000×15.000 pixelů (165 Mpix). Druhou možností je použití velkých přesně uspořádaných čipů (matic prvků CCD) o rozměrech až 7.168×4.096 prvků (29 Mpix). Pro práce nižší přesnosti a na kratší vzdálenosti je možné použít kvalitní profesionální digitální kamery (digitální zrcadlovky) upravené pro měřické účely (tj. *semiměřické komory*) nebo i bez dalších úprav (*komory neměřické*).²⁵

²³ U měřických snímků požadujeme vnitřní přesnost v poloze bodu cca $1\text{ }\mu\text{m}$. Se stejnou přesností provádíme i měření snímkových souřadnic.

²⁴ První digitální komory určené pro leteckou fotogrammetrii, které mohou s dostatečnou přesností nahradit celé obrazové pole klasického snímku $23 \times 23\text{ cm}$ jedním snímačem jsou k dispozici od roku 2012 (firma Z/I Imaging, Německo, člen skupiny Hexagon).

²⁵ Při použití digitálních profesionálních komor středního formátu s tzv. digitální stěnou je možné dosáhnout extrémně velkého rozlišení obrazu (např. až 80 Mpix). Ani v těchto případech ale nebude splněna podmínka vysoké přesnosti stanovená pro měřické komory.

V *letecké fotogrammetrii* dosahují největšího formátu snímku digitální měřické komory konstruované na principu *vícenásobné komory*. Takto je dosaženo rozměru digitálního snímku až 20.010 x 13.080 pixelů (260 Mpix). Komory využívající pro snímkování jediný snímač mohou mít v současné době rozměr snímku až 16.768 x 14.016 pixelů (235 Mpix). Na odlišném principu jsou konstruované komory pro snímání souvislého obrazového pásu *řádkou prvků CCD* (délky až 20.000 pix). Ve všech případech se jedná pouze o snímky panchromatické (černobílé).

V *dálkovém průzkumu Země* (DPZ) se pro sběr přímo digitálních obrazových dat používají mechanické a elektronické *obrazové skenující radiometry* (skenery).

➤ **sekundární (druhotná) digitalizace**

Provádí se *skenování* (postupné snímání) analogové předlohy.

➤ Předlohy pro skenování:

- **šedotónové** – pro digitalizaci postačuje rozklad na 256 stupňů šedi,
- barevné** – provádí se rozklad barevného obrazu do tří základních barev systému RGB
- **průsvitné** (transparentní) – čidlo zaznamená *světlo prošlé* negativem nebo diapozitivem na průsvitných podložkách,
- neprůsvitné** – čidlo zaznamená *světlo odražené* od pozitivu na neprůsvitné podložce.

U sekundárně digitalizovaných (skenovaných) snímků je třeba počítat s vlivem srážky, která je způsobena procesem vyvolávání analogového snímku (namáčení a sušení). *Oprava vlivu srážky* se provádí transformací na správnou polohu rámových značek, která je dána jejich snímkovými souřadnicemi uvedenými výrobcem komory v kalibračním protokolu. U semiměřických réseau komor se ke stejnému účelu používá síť křížků zobrazených v celé ploše snímku.

➤ Skenery:

- **běžné** – rozlišení cca 1200 - 4800 DPI, tj. hardwarové rozlišení, které uvádí skutečně snímání body. Výrobci často uvádějí také vyšší softwarové rozlišení, které ale nepřináší žádná nová data (další pixely jsou dopočítávány dělením skutečně snímaných bodů pomocí interpolace). Maximální formáty předloh jsou A4 až A3. Barevná hloubka při snímání může být až 40 bitů a snižuje se při uložení obrazu do zvoleného formátu datového souboru (např. na 8 nebo 24 bitů).

Přestože rozlišení těchto skenerů je dostatečné, jsou *nevhodné pro použití ve fotogrammetrii*. Nemají totiž požadovanou přesnost uspořádání a orientace čidel v řádce, ani přesnost pohybu čidel pod předlohou. Nemohou zajistit zachování vnitřní přesnosti měřických snímků.

- **pevné laboratorní** – rozlišení se pohybuje v rozmezí 1000-2000 DPI (výjimečně až 8500 DPI). Umožňují snímat předlohy standardního formátu leteckého snímku 23 x 23 cm na průsvitných podložkách.

Základní charakteristikou skenerů určených pro digitalizaci měřických snímků je *vysoká geometrická přesnost* uspořádání čidel a přesnost pohybu předlohy nad snímačem. Výrobky splňující značné požadavky na přesnost se vyznačují vysokou pořizovací cenou (statisíce až miliony korun). Do této skupiny patří také fotogrammetrické skenery.

- Vlastnosti fotogrammetrických skenerů (dle údajů uváděných výrobcí):
 - *rozlišení* (velikost CCD): 3, 4, 5, 7, 10, 12-15 μm , umožněna je volba nižšího rozlišení v násobcích velikosti CCD (např. pro CCD velikosti 7 μm je možné volit také rozlišení 14, 21, 28, 56, 112 a 224 μm),
 - *geometrická přesnost*: požadovaná přesnost pro uspořádání čidel a pohyb předlohy nad snímačem je 1-2 μm ,
 - *radiometrické rozlišení* (barevná hloubka): 8, 10, 12 až 48 bitů, volitelná pro snímání (výsledná barevná hloubka snímku závisí na formátu uložení datového souboru),
 - *maximální velikost předlohy*: největší možné rozměry (např. 260 x 260, 250 x 275, 330 x 440 mm), vždy je umožněno skenovat alespoň standardní formát leteckého měřického snímku 230 x 230 mm, buď jednotlivé snímky, nebo i z nerozřezané role filmu,²⁶
 - *osvit*: stabilním světelným zdrojem, který nemění svoje charakteristiky (např. halogenová nebo xenonová výbojka),²⁷
 - *systém snímání barevné předlohy*: používá se technologie se třemi průchody předlohy a třemi různými barevnými filtry (RGB) nebo se třemi senzory s představenými filtry (RGB) a jedním průchodem předlohy (viz další text),
 - *ovládací programy*: mohou být instalovány na platformách UNIX i Windows,
 - *hardware*: výkonný osobní počítač (PC) nebo pracovní stanice s úložištěm pro velké objemy dat (pásková jednotka, CD/DVD-RW nebo externí disky),
 - *rychlost skenování* – závisí na zvoleném rozlišení a barevné hloubce (pro jeden barevný letecký snímek je doba skenování přibližně 7 minut).
- Volba rozlišení pro skenování měřických snímků:

$$DPI = k \cdot \frac{25,4}{\Delta x / m_s} = \frac{k \cdot m_s \cdot 25,4}{\Delta x},$$

kde m_s je měřítkové číslo snímku, Δx požadovaná přesnost v mm , k volitelná konstanta zabezpečující požadovanou přesnost (volíme v rozmezí 2-3), **25,4** je délka palce v mm .²⁸

²⁶ Většina zařízení nabízí automatický posun filmu ve skeneru a ukládání nasnímaných obrazů do samostatných souborů. Celá role filmu tak může být skenována plně automaticky.

²⁷ Po stanoveném počtu hodin provozu je třeba světelný zdroj vyměnit, aby byly zachovány stále stejné podmínky osvětlení.

²⁸ Výpočet převádí požadovanou přesnost do měřítka snímku. Tato hodnota odpovídá velikosti jednoho pixelu na digitalizovaném snímku, kterou je dělena délka jednoho palce (viz také definice DPI). Výsledek je násoben konstantou, která zdvojnásobí nebo ztrojnásobí rozlišení požadované pro skenování.

➤ Tvorba barevného obrazu

Všechny tři uvedené postupy vytvářejí barevné obrazy v systému RGB. Jejich úkolem je získat digitální výstup pro tři základní barvy: červenou, zelenou a modrou:

- **tři průchody** (*three pass*) – předloha je snímána třikrát, pokaždé s jiným předřazeným barevným filtrem (RGB) pomocí jednoho senzoru; používá se ve skenerech; výhodou je jednoduchá konstrukce zařízení a kvalitní barevné podání; naopak nevýhodou velká časová prodleva
- **tři senzory** – světlo se rozkládá do barevného spektra (hranolem nebo mřížkou), ze kterého se třemi filtry vymezí a třemi senzory zaznamenávají základní barvy (RGB); používá se v profesionálních komorách, kvalitních videokamerách a skenerech
- **jedna expozice** (*one shot*) – barevné filtry jsou nanášeny přímo na čidlech uspořádaných do řádek a sloupců v senzoru (čipu), sousední čidla tvoří čtveřici s barvami RGBG²⁹ – toto uspořádání se nazývá Bayerova mřížka nebo filtr³⁰; každá čtveřice čidel dává výstupní barevný signál pro jeden pixel; výsledný počet pixelů je v každé řádce a v každém sloupci o jeden menší než je počet čidel v řádku resp. ve sloupci; plně barevný obraz vzniká během jedné expozice; používá se u většiny digitálních fotoaparátů.



Pro pořizování digitálních obrazových dat bylo vyvinuto několik dalších technologií, které ovšem zatím nenašly širšího uplatnění. Jsou to například:

- *FujiFilm Super CCD* – čidla ve tvaru osmihranu s diagonálním uspořádáním; lidské oko méně vnímá linie úhlopříčné než horizontální a vertikální, které mohou působit rušivě
- *Foveon X3 / FujiFilm Organic CMOS* – tři světlopropustná křemíková čidla umístěná nad sebou využívají pro oddělení barevných složek pohltivost světla vrstvou křemíku o určité tloušťce nebo organických barviv (stejný s principem barevného filmu v klasické analogové fotografii)

²⁹ Zelená barva se opakuje dvakrát a její výstupní signál (G) se proto musí dělit dvěma. Důvodem pro toto řešení je zvýšená citlivost lidského oka na žlutozelenou barvu.

³⁰ Podle svého vynálezce Bryce E. Bayera z firmy Kodak.