

1

VOJENSKÝ
TOPOGRAFICKÝ
OBZOR



1959

VOJENSKÝ TOPOGRAFICKÝ OBZOR

SBORNÍK MINISTERSTVA NÁRODNÍ OBRANY

Číslo 1

1959

Inženýr plukovník prof. Dr. Josef Vykutíl, VA AZ:

Tíhové korekce geometrické nivelace a „normální“ výšky v baltském systému

Odlíšnost výšek v jaderském a baltském systému. Vliv tíhového pole Země na výsledky geometrické nivelace. Snahy o souborné vyrovnání „evropské“ nivelační sítě. Geopotenciální kóty a jejich definice. Dynamické výšky. Pravé (geoidické) ortometrické výšky. Aproximativní ortometrické výšky (normální ortometrické, Helmerovy, Niethammerovy, Ramsayerovy). Normální výšky podle teorie M. S. Moloděnského. Vzorce pro praktický výpočet „normálních“ výškových rozdílů. Vztah mezi „normálními“ a „normálními ortometrickými“ opravami nivelace. Závěrečné poznámky.

Úvodem

Vládní usnesení ze dne 28. července 1953 stanoví, že československé geodetické a kartografické dílo bude zapojeno do mezinárodního geodetického a kartografického díla. Pokud jde o výšky, zavádí se „baltský“ systém s výchozím výškovým bodem v nule Kronštadtského vodočtu.

Vojenská topografická služba přistoupila hned k převedení dosavadních „jaderských“ výšek na „baltské“, a to odečtením 0,68 m od výšek jaderských. Na vojenských topografických mapách je uváděn výškový systém baltský. Konstanta 0,68 m byla v té době uváděna jako rozdíl výchozích výškových bodů v Kronštadu a Terstu.

Ústřední správa geodesie a kartografie rozhodnutím ze dne 17. února 1955 zavedla „výškový systém baltský $-0,46$ m“, stručně označovaný B 46. Výšky „baltské“ se dostanou odečtením konstanty 0,46 m od výšek „jaderských“. Rozdíl obou systémů (0,46 m) byl získán z identického bodu naší a sovětské nivelace v Čierné nad Tisou — viz [1].

Oba uvedené převody „jaderských“ výšek na výšky „baltské“ je třeba považovat za předběžné. Výšky v jaderském systému nelze s dostatečnou přesností převést do systému baltského odečtením konstanty. Takové „baltské“ výšky vyhoví jen pro mapovací účely a běžné, méně přesné

výškopisné práce. Rozdíly výšek v obou systémech jsou způsobeny nejen jinými výchozími body (jinou střední hladinou moří), ale také odlišným výpočtem korekcí ze sbíhavosti a nepravidelného průběhu hladinových ploch a jiným vyrovnáním nivelačních sítí.

V baltském systému jsou výšky jinak definovány než v systému jaderském: sbíhavost a nepravidelný průběh hladinových ploch se v baltském systému respektuje zavedením „normálních“ korekcí; v jaderském systému se uvažuje jen sbíhavost hladinových ploch normálního tíhového pole Země „normálními ortometrickými“ korekcemi.

Úkolem tohoto pojednání je seznámit s teoretickou podstatou „normálních“ výšek. Abychom mohli vzájemně srovnávat „normální“ a jiné výšky, poznat nutnost a výhody „normálních“ výšek, uvedu nejprve stručně některé základní poznatky o vlivu tíže na geometrickou nivelaci a některé tíhové korekce nivelačních výsledků.

1. Geometrická nivelace a tíhové pole Země

Při měření výškových rozdílů geometrickou nivelací se nivelační stroj staví v terénu na bodech o různé výšce. Libela nivelačního stroje se urovňuje do směru kolmého k tížnici v uvažovaném bodě. Plochu, která je v každém svém bodě kolmá na směr tíže (tížnici), nazýváme plochou *h l a d i n o v o u*. Je to geometrické místo bodů stejného potenciálu tíže (plocha ekvipotenciální). Libela nivelačního stroje v libovolném bodě je vlastně malou částí příslušné hladinové plochy.

Geoid je hladinová plocha, přibližně totožná se střední hladinou moří, prodloužených pod kontinenty.

Hladinová plocha procházející bodem *A* má tedy konstantní potenciál W_A :

$$W_A = konst.$$

Rozdíl potenciálů dvou hladinových ploch jdoucích body *A* a *B* je rovněž konstantní:

$$\Delta W = W_B - W_A = konst.$$

Derivace potenciálu *W* ve směru vnější normály *h* je rovna zápornému tíhovému zrychlení *g*:

$$\frac{dW}{dh} = -g.$$

což lze psát také

$$dW = -g dh. \quad (1)$$

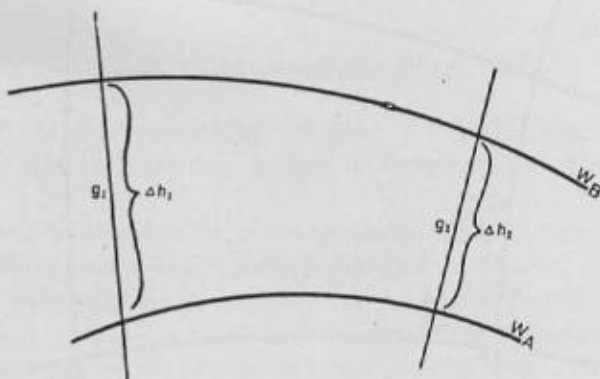
V bodě o tíhovém zrychlení g jsou tedy dvě nekonečně blízké hladinové plochy, jejichž potenciálový rozdíl je dW , od sebe vzdáleny o dh . Přejdeme-li k hodnotám konečným, bude

$$\Delta W = -g \Delta h = konst. \quad (2)$$

Tíhové zrychlení g roste (vlivem zemské rotace) od rovníku k pólům. Má-li být splněna rovnice (2), musí se odlehlost hladinových ploch s rostoucím g zmenšovat. Hladinové plochy nejsou proto rovnoběžné, ale sbíhají se k pólům. Nepravidelné rozložení hmot pod zemským povrchem způsobuje další nepravidelnosti v průběhu hladinových ploch.

Z rovnice (2) a obrázku 1, kde W_A , W_B jsou označeny hladinové plochy, vyplývá:

$$g_1 \Delta h_1 = g_2 \Delta h_2 = \dots = konst. \quad (3)$$



Obr. 1

Chceme-li určit výšku libovolného bodu na zemském povrchu, musíme zvolit některou hladinovou plochu za základní (nulovou). Tato hladinová plocha se volí tak, že prochází zvoleným nulovým výškovým bodem, který byl zjištěn jako střední hladina některého moře, na příklad J a d e r s k é h o nebo B a l t s k é h o. Vlivem různého tlaku vzduchu, obsahu soli, převládajících větrů, teploty aj. se střední hladiny světových moří od sebe liší v mezích několika decimetrů — [2].

Sbíhavost a nepravidelný průběh hladinových ploch způsobují, že nemůžeme geometrickou nivelací přímo určit výšky bodů.

Body A , B na obr. 2 leží v téže hladinové ploše; A_0 , B_0 jsou jejich průměty podél tížnic do hladinové plochy nulové. Jsou-li H_A a H_B výšky bodů, měřené podél tížnic, je zřejmé, že nivelací

po trati $A_0 \rightarrow A \rightarrow B$

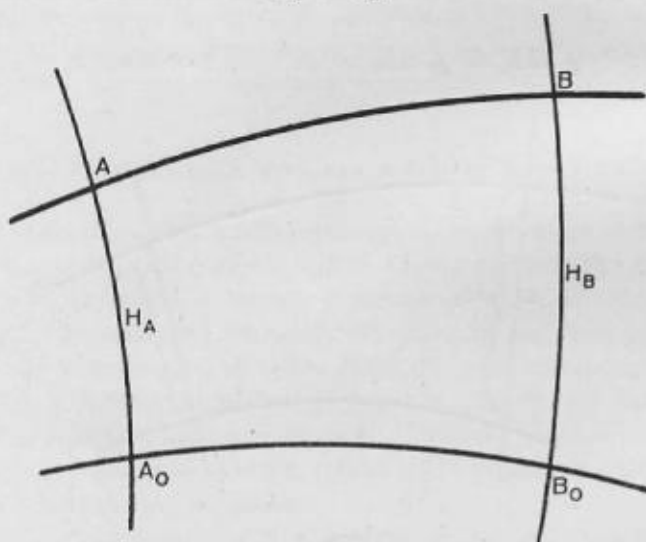
naměříme $\Sigma dh = H_A$,

neboť při nivelaci z A do B (v téže hladinové ploše) neměříme žádné převýšení. Budeme-li nivelovat po trati $A_0 \rightarrow B_0 \rightarrow B$, dostaneme ze stejných důvodů výsledek

$$\Sigma dh = H_B.$$

Protože hladinové plochy nejsou rovnoběžné, je

$$H_A \neq H_B.$$



Obr. 2

Výsledek nivelace tedy závisí na nivelační trati. Abychom dostali jednoznačné výsledky, musíme „nivelovaná“ převýšení opravit o vliv sbíhavosti a nepravidelnosti hladinových ploch.

Potenciály hladinových ploch charakterizuje tíhové zrychlení g , které potřebujeme znát pro určení příslušných korekcí. Až do nedávné doby bylo obtížné měřit tíhová zrychlení (kyvadlovými přístroji) na mnoha bodech zemského povrchu (podél nivelačních pořadů). Místo skutečných hodnot tíhových zrychlení se uvažovaly hodnoty „normální“, počítané pro body o zeměpisné šířce φ a nulovou hladinu ze vzorce Helmertova

$$\gamma = 978,030 \text{ gal} (1 + 0,005302 \sin^2 \varphi - 0,000007 \sin^2 2\varphi), \quad (4)$$

nebo podle Cassinise

$$\gamma = 978,049 \text{gal} (1 + 0,0052884 \sin^2 \varphi - 0,0000059 \sin^2 2\varphi).$$

V posledních 20 letech vývoj statických gravimetrů umožnil rychlé a snadné měření tíhového zrychlení v terénu, takže se dnes již nemůžeme spokojit jen s „normálními“ hodnotami tíhových zrychlení. Při zpracování nivelací je třeba uvažovat skutečné (měřené) hodnoty. Jinak, zvláště v horských oblastech, uzávěry nivelačních pořadů jsou nepřipustně velké.

Helmerť v roce 1890 publikoval práci [3], ve které navrhl redukci nivelačních měření se zřetelem na skutečné tíhové pole Země. Od té doby (a zvláště v posledních letech) se literatura o vlivu tíhového pole Země na nivelaci velmi rozrostla. Byla navržena celá řada tíhových korekcí nivelace. Tyto korekce ukazují, jak se z nivelačních výsledků počítají výšky, a tedy vlastně různé korekce definují různé výšky.

2. Geopotenciální kóty

V různých státech jsou výšky vztaženy k různým středním hladinám moří. Také korekce nivelačních měření a vyrovnání nivelací jsou nejednotné.

Již na první konferenci Středoevropského stupňového měření r. 1864 v Berlíně se diskutovalo o vytvoření jednotné nivelační sítě I. řádu pro Evropu, která by spojovala maregrafy na pobřeží různých moří a o jediném (společném) výškovém bodě pro Evropu. Touto otázkou se zabývaly četné další konference Středoevropského stupňového měření a později Valná shromáždění Mezinárodní unie geodetické a geofyzikální (MUGG). Na Valném shromáždění MUGG r. 1936 v Edinburgu navrhl prof. Dr. Semerád souborné vyrovnání evropské nivelační sítě, neboť podle jeho názoru byl již k dispozici dostatečný materiál pro tuto práci – [4].

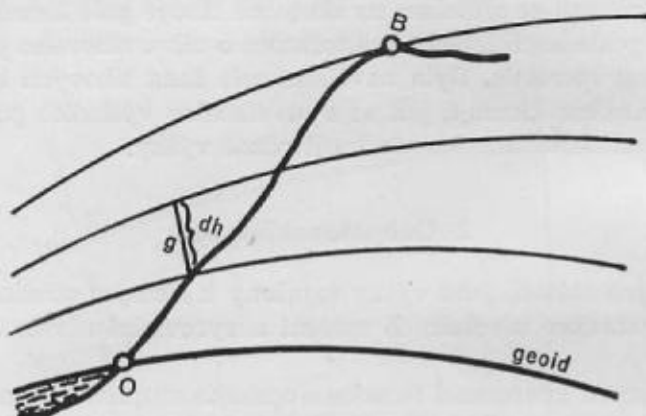
V r. 1948 na Valném shromáždění MUGG v Oslo žádal T. J. Kukkamäki znovu jednotné vyrovnání evropské základní nivelační sítě. Poukázal přitom na to, že ve většině evropských zemí jsou již vybudovány sítě velmi přesné nivelace, které jsou však vztaženy k různým výchozím bodům a samostatně vyrovnány. Otázka byla na pořadu také v r. 1951 v Bruselu.

V r. 1954 na Valném shromáždění MUGG v Římě byla vytvořena „Mezinárodní komise pro vyrovnání evropské nivelační sítě“.

Z dalšího textu bude zřejmé, že nejde o „evropskou“ nivelační síť, ale o „západoevropskou“ nebo „atlantickou“ síť. Aby nedošlo k nedorozu-

mění, budeme tuto síť označovat „evropská“, neboť tak je uváděna v mezinárodní literatuře.

Sovětský svaz nebyl v r. 1954, kdy se vytvářela uvedená komise, členem MUGG a také ostatní lidově demokratické státy nebyly zastoupeny vůbec, nebo jen malou delegací. Proto (a také z důvodů mezinárodně politických) se SSSR a lidově demokratické státy (s výjimkou Maďarska) nezúčastnily jednání. Přesto bude zajímavé sledovat práci uvedené mezinárodní komise.



Obr. 3

Mezinárodní komise pro vyrovnání evropské nivelační sítě se sešla na pracovním zasedání ve Florencii v květnu 1955. Zasedání se zúčastnili zástupci Švýcarska, Itálie, Německé spolkové republiky, Belgie, Holandska, Dánska, Švédsko, Norsko, Finsko, Velké Británie, Francie, Španělska, Turecko, Maďarsko, Rakousko a Jugoslávie. Omluvil se Sovětský svaz, Československo, Řecko, Portugalsko a Irsko. Na zasedání byly vytvořeny 3 podkomise, jejichž úkolem bylo:

1. Navrhnout jednotnou evropskou nivelační síť.
2. Navrhnout metodu vyrovnání a vlastní vyrovnání sítě.
3. Stanovit zásady pro použití tíhových údajů při výpočtu výšek.

Komise přijala jednomyslně označení „geopotenciální kóty“ (cote géo-potentielle) pro veličiny, které charakterizují hladinové plochy. Geopotenciální kóta c jisté hladinové plochy znamená práci, které je třeba k přenesení hmotné jednotky ze vztažené hladinové plochy (geoidu) do uvažované hladinové plochy. Geopotenciální kóta c_B hladinové plochy

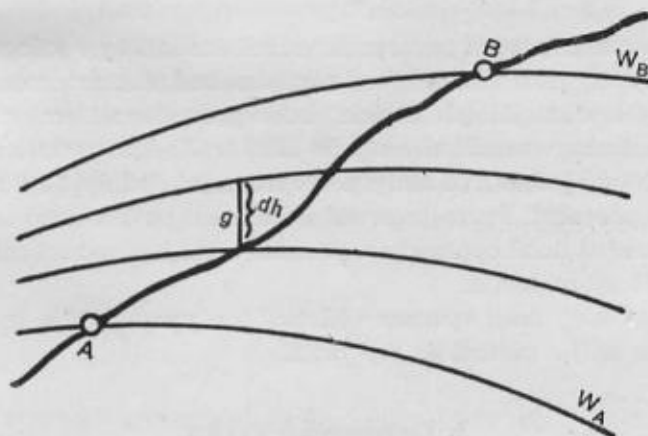
jdoucí bodem B (geopotenciální kóta bodu B) je tedy rovna [viz rovnici (1) a obr. 3].

$$c_B = W_0 - W_B = \int_0^B g \, dh. \quad (5)$$

P o z n á m k y: Kóta neznamená výšku, ale určitý údaj – viz na příklad kóty v matematice, nomografii, na technických výkresech aj. V rovnici (5) by na pravé straně měl správně být křivkový integrál; protože však při praktickém počítání nahrazujeme integrování sčítáním konečných hodnot, není nezbytně nutné psát integrál křivkový.

Geopotenciální kóty zřejmě nejsou závislé na nivelační trati.

Uvažujme dva blízké body A, B na zemském povrchu, jimiž prochází hladinové plochy o potenciálech W_A, W_B (obr. 4). Rozdíl potenciálů bude roven:



Obr. 4

$$\Delta W = W_B - W_A = \int_A^B g \, dh. \quad (6)$$

Pro praktické výpočty nahradíme v rovnici (6) integrál součtem konečných hodnot. Dostaneme tak pro rozdíl potenciálů ΔW (rozdíl geopotenciálních kót $\Delta c = c_B - c_A$):

$$\Delta W = \Delta c = \sum_A^B \frac{g_A + g_B}{2} \Delta h, \quad (7)$$

kde g_A, g_B jsou hodnoty skutečného tíhového zrychlení v bodech A a B , Δh je nivelované převýšení mezi body A, B – viz [5].

Ze vzorce (7) je zřejmé, že geopotenciální kóty (rozdíl geopotenciálních kót) vypočteme z hodnot tíhového zrychlení a nivelačních převýšení, měřených na zemském povrchu, tedy bez hypotes. Geopotenciální kóty mají charakter práce: nejsou vyjádřeny v jednotkách délkových. Numerické hodnoty geopotenciálních kót se v mezích 2 ‰ blíží výškám bodů v metrech, vyjádří-li se tíhové zrychlení v kilogalech.

Měření tíhových zrychlení pro výpočet geopotenciálních kót musí být tím hustší, čím jsou větší převýšení, tíhové anomálie a topografické redukce. Pokud jde o tíhové anomálie a topografické redukce, odkazují na knihu [6], kde jsou tyto pojmy dokonale vysvětleny. Jako obecnou směrnicí (za normálních podmínek) doporučuje Mezinárodní komise pro vyrovnání evropské nivelační sítě měřit tíhové zrychlení ve vzdálenostech

- 2–3 km v plochem terénu
- 1–2 km v pahorkatinách,
- 0,3–1,2 km v silně kopcovitém terénu.

Geopotenciální kóty v „evropské“ nivelační síti (g v kilogalech vzhledem k Postupimi) jsou vztaženy na základní bod v Amsterdamu. Vyrovnání sítě v „geopotenciálních kótách“ bude provedeno třemi různými způsoby. Na pracovním zasedání na jaře 1957 v Kodani bylo konstatováno, že materiál, který jednotlivé státy pro vyrovnání dodaly, je z různých dob a má různou přesnost. Proto je první vyrovnání považováno za provisorní a bude v dohledné době opakováno, jakmile bude k dispozici moderní a homogenní měřický materiál.

Geopotenciální kóty mají význam vědecký (při vyrovnání a spojování velmi rozsáhlých sítí) a nehodí se pro praxi.

3. Dynamické výšky

Ve stati 1 jsme dokázali, že velikost výškového rozdílu je v geometrické nivelaci závislá na nivelační trati (cestě); ve stati 2 je ukázáno, že rozdíl geopotenciálních kót dvou bodů (rozdíl potenciálů dvou hladinových ploch) lze určit z tíhových a nivelačních měření na zemském povrchu a že tento rozdíl nezávisí na trati, ve které bylo měřeno.

Uvažujeme-li konečné hodnoty, je podle rovnice (5) geopotenciální kóta bodu B (viz obr. 3) rovna:

$$c_B = \sum_0^B g \Delta h. \quad (8)$$

Výsledek, vypočtený podle rovnice (8) má rozměr gal \times metr, vyjádříme-li tíhové zrychlení v galech a nivelované převýšení v metrech.

Dělíme-li rovnici (5), resp. (8) vhodnou, jinak však libovolnou hodnotou tíhového zrychlení \bar{g}_0 dostaneme tzv. dynamickou výšku H_d^B bodu B , která je vyjádřena v metrech:

$$H_d^B = \frac{1}{g_0} \int_0^B g dh \doteq \frac{1}{g_0} \sum_0^B g \Delta h. \quad (9)$$

Rovnici (9) můžeme jednoduše psát takto:

$$H_d^B = \frac{c_B}{g_0}.$$

Konstanta \bar{g}_0 je volena různě. Nejčastěji je to hodnota normálního tíhového zrychlení na hladině moře v zeměpisné šířce 45° . Podle Helmer-tova vzorce je $\gamma_{0,45} = 980,616$ gal. Může však být zvolena také tak, že pro určité území dává minimální korekce naměřených výškových rozdílů. Takto posuzováno, jsou vlastně geopotenciální kóty v „evropské“ nive-lační síti, o nichž jsme mluvili ve stati 2, do jisté míry výšky dynamické. Vyjádření tíhového zrychlení v kilogalech znamená, že jsme dělili tisí-cem, což je (s chybou 2 ‰) přibližné tíhové zrychlení v galech. Proto také se geopotenciální kóty liší od nadmořských výšek o zminěná 2 ‰ – viz [7].

Neznáme-li skutečné tíhové zrychlení g , dosadíme do vzorce (9) hod-noty normální γ a dostaneme „normální dynamickou“ výšku $H_{d,n}^B$:

$$H_{d,n}^B = \frac{1}{\gamma_0} \int_0^B \gamma dh \doteq \frac{1}{\gamma_0} \sum_0^B \gamma \Delta h.$$

Výhodou dynamických výšek je to, že dva body ležící v téže hladinové ploše mají stejnou dynamickou výšku. Jsou proto dynamické výšky vhodné zejména pro velké vodní stavby.

Nevýhodou dynamických výšek je, že korekce dosahují větších hod-not: rozdíl dynamických výšek dvou bodů se značněji liší od výsledku, který dostaneme geometrickou nivelací v terénu.

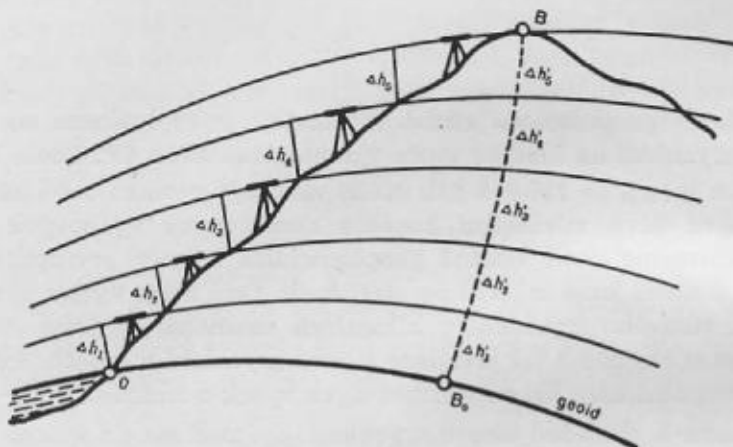
4. Ortometrické výšky

4.1 Pravé ortometrické (geoidické) výšky

Ortometrickou výškou bodu rozumíme vzdálenost tohoto bodu od geoidu, měřenou podél tížnice procházející tímto bodem. Podle této defi-nice je ortometrickou výškou bodu B na obr. 5 vzdálenost $\widehat{B_0B}$.

Označme naměřená nivelační převýšení (od hladiny moře po bod B) $\Delta h_1, \Delta h_2, \Delta h_3, \dots$, měřené tíhové zrychlení v odpovídajících bodech trasy \widehat{OB} g_1, g_2, g_3, \dots — viz [8].
Podle rovnice (3) bude:

$$g_1 \Delta h_1 = g_2 \Delta h_2 = \dots = konst.$$



Obr. 5

Tíhové zrychlení v odpovídajících hladinových plochách v tížnici $\widehat{B_0B}$ označme g'_1, g'_2, g'_3, \dots a vzdálenost hladinových ploch $\Delta h'_1, \Delta h'_2, \Delta h'_3, \dots$. Potom bude podobně

$$g'_1 \Delta h'_1 = g'_2 \Delta h'_2 = \dots = konst.$$

Z uvedených vztahů můžeme psát:

$$\begin{aligned} g_1 \Delta h_1 &= g'_1 \Delta h'_1 \\ g_2 \Delta h_2 &= g'_2 \Delta h'_2 \\ g_3 \Delta h_3 &= g'_3 \Delta h'_3 \\ &\vdots \\ &\vdots \end{aligned}$$

$$\sum_0^B g \Delta h = \sum_{B_0}^B g' \Delta h'$$

a v limitě

$$\int_0^B g dh = \int_{B_0}^B g' dh'. \quad (10)$$

Levá strana rovnice (10) je geopotenciální kóta c_B bodu B . Dosadíme-li do integrálu na pravé straně *střední hodnotu tíhového zrychlení podél tížnice* $\widehat{B_0B}$ (pro daný bod konstantní hodnotu G), bude

$$\int_0^B g dh = G \int_{B_0}^B dh'. \quad (11)$$

Integrál na pravé straně rovnice (11) je však *pravá (geodetická) ortometrická výška* H_g^B bodu B :

$$\int_{B_0}^B dh' = H_g^B,$$

kterou vypočteme po dosazení do rovnice (11)

$$H_g^B = \frac{1}{G} \int_0^B g dh. \quad (12)$$

Rovnici (12) můžeme jednoduše psát

$$H_g^B = \frac{c_B}{G}. \quad (13)$$

Přihlédneme-li k rovnici (8), můžeme psát:

$$H_g^B \doteq \frac{1}{G} \sum_0^B g \Delta h. \quad (14)$$

Připočteme-li na pravé straně rovnice (14) nulový výraz

$$\sum_0^B \Delta h - \sum_0^B \frac{G}{G} \Delta h,$$

dostaneme:

$$H_g^B \doteq \frac{1}{G} \sum_0^B g \Delta h + \sum_0^B \Delta h - \sum_0^B \frac{G}{G} \Delta h. \quad (15)$$

Rovnici (15) můžeme psát také takto:

$$H_g^B = \sum_0^B \Delta h + \frac{1}{G} \sum_0^B (g - G) \Delta h. \quad (16)$$

První člen na pravé straně rovnice (16) je součet nivelačních převýšení. Druhý člen znamená opravu z nepravidelného průběhu hladinových ploch, tj. pravou ortometrickou korekci (opravu) C_g :

$$C_g = \frac{1}{G} \sum_0^B (g - G) \Delta h. \quad (17)$$

Hodnoty tíhových zrychlení mezi povrchem Země a geoidem nemůžeme měřit; nemůžeme tedy vypočítat veličinu G a *nedovedeme proto ani určit pravou (geoidickou) ortometrickou výšku bodů na zemském povrchu*. Při praktických výpočtech nivelací se skutečné hodnoty G nahrazují hodnotami aproximativními. Způsob výpočtu korekcí nivelačních měření je pak jednou z charakteristik výškového systému.

4.2 Normální ortometrické výšky

Při budování naší státní nivelační sítě nebyly ještě vhodné přístroje (gravimetry) pro měření tíhového zrychlení na velkém počtu bodů. Do vzorce pro výpočet ortometrických korekcí byly proto místo skutečných hodnot tíhového zrychlení dosazeny hodnoty normální.

Normální tíhové zrychlení γ v bodě zemského povrchu o výšce H a zeměpisné šířce φ se počítá ze vzorce – viz [6]:

$$\gamma = \gamma_a \left(1 + \alpha \cdot \sin^2 \varphi - \frac{2H}{r} \right). \quad (18)$$

Střední normální tíhové zrychlení γ_m^B v tížnici bodu B o nadmořské výšce H^B a zeměpisné šířce φ_B se vypočte ze vzorce

$$\gamma_m^B = \gamma_a \left(1 + \alpha \sin^2 \varphi_B - \frac{H^B}{r} \right), \quad (19)$$

kde γ_a je normální tíhové zrychlení v nulové hladině na rovníku,

α je tíhový součinitel,

r je poloměr Země,

H, H^B jsou hrubé (nivelované) výšky.

Ve vzorci Helmertově [viz rovnici (4)] je

$$\gamma_a = 978,030 \text{ gal}$$

$$\alpha = 0,005 \ 302$$

Normální ortometrická výška H_γ^B bodu B je – analogicky rovnici (12) – definována vztahem:

$$H_\gamma^B = \frac{1}{\gamma_m^B} \int_0^B \gamma \, dh \quad (20)$$

a vzorec pro normální ortometrickou korekci C_γ bude mít tvar – viz rovnici (17):

$$C_\gamma = \frac{1}{\gamma_m^B} \sum_0^B (\gamma - \gamma_m^B) \Delta h. \quad (21)$$

V naší nivelační síti byly normální ortometrické korekce (pro nivelační převýšení) počítány podle známého, zjednodušeného vzorce

$$C_{\gamma} = -2\beta H_s \sin 2\varphi_s \Delta\varphi, \quad (22)$$

který byl odvozen jinou cestou, ale dává stejné výsledky jako vzorec (21) – viz [6], str. 425–427.

Jaderský výškový systém má tedy „normální ortometrické výšky“. V nejnovější sovětské literatuře se těmto výškám říká „přibližné“ (približennyje vysoty) – viz na příklad [9].

Normální ortometrická korekce opravuje naměřená nivelační převýšení jen ze sbíhavosti hladinových ploch *normálního tíhového pole* a nepřihlíží ke skutečnému potenciálu (ke skutečným hodnotám tíhových zrychlení). Tato korekce byla oprávněná v době, kdy měření tíhového zrychlení kyvadlovými přístroji bylo zdouhavé a nákladné, není však oprávněná dnes, kdy měření tíhových zrychlení statickými gravimetry je velmi rychlé, snadné a velmi přesné.

4.3 Ortometrické výšky podle Helmerta

Rozdíl mezi „pravou ortometrickou“ a „normální ortometrickou“ korekcí může (zejména v horských oblastech) dosáhnout i několika desítek centimetrů. Na příklad v r. 1870 dosáhl uzávěr švýcarského nivelačního pořadu, který vedl dvakrát přes Alpy, hodnoty 1,186 m. Zachariae připouštěl možnost uzávěru více než 1 m vlivem nepravidelného průběhu hladinových ploch v daném území. Později se ukázalo, že v měření byla hrubá chyba, ale i tak velký uzávěr vedl Helmerta a Zachariae ke studiu vlivu skutečného tíhového pole Země na výsledky geometrické nivelace – viz [10]. Později změřil Robert v. Sterneck kyvadlovým přístrojem tíhové zrychlení podél nivelačního pořadu v tyrolských Alpách (Bolzano – Brixen – Brenner – Innsbruck – Landeck – Meran – Bolzano) o celkové délce 356 km a s výškovým rozdílem 1250 m. Uzávěr tohoto pořadu byl – 180 mm. Zde mohl Helmert prakticky přezkoušet své teoretické úvahy. Výsledky publikoval r. 1890 – viz [3].

Helmert nahrazuje v rovnici (12) skutečné střední tíhové zrychlení G hodnotou G_H počítanou ze vzorce:

$$G_H = g_B \left(1 + \frac{H^B}{r} - \frac{3}{2} \frac{\delta}{\delta_s} \frac{H^B}{r} \right), \quad (23)$$

kde g_B je měřené tíhové zrychlení v bodě B ,

δ je hustota „Bouguerovy desky“ o výšce H^B

δ_s je střední hustota Země.

Veličina G_H je tedy tíhové zrychlení, redukované podle Bouguera pro střed tížnice (poloviční výšku) bodu B . Pro praktické výpočty lze do vzorce (23) dosadit pro určitou oblast konstantní r , δ , δ_s . V práci [11] je vzorec upraven takto:

$$G_H = g_B + 0,0414 H^B mgl \text{ (pro } H^B \text{ v metrech)}$$

Helmertova ortometrická výška H_H^B bodu B je tedy definována rovnicí:

$$H_H^B = \frac{1}{G_H} \int_0^B g \, dh \quad (24)$$

nebo, použijeme-li zavedeného označení c_B pro geopotenciální kótu bodu B :

$$H_H^B = \frac{c_B}{G_H}. \quad (25)$$

Helmertovu ortometrickou korekci C_H pak můžeme zřejmě psát ve tvaru

$$C_H = \frac{1}{G_H} \int_0^B (g - G_H) \, dh. \quad (26)$$

Helmert počítá střední hodnotu tíhového zrychlení v tížnici bodu B za určitých předpokladů o složení zemské kůry a tedy jeho korekce i výšky jsou aproximativní. Podle údajů různých autorů se však Helmertovy výšky i v horských oblastech liší od pravých ortometrických výšek nejvýše o několik centimetrů.

4.4 Ortometrické výšky podle Niethammera

Podstata Niethammerovy ortometrické korekce spočívá v tom, že při výpočtu středního tíhového zrychlení v tížnici bodu B uvažuje také topografické opravy – na rozdíl od Helmerta, který je zanedbává – viz [12], [6].

Střední tíhové zrychlení podle Niethammera G_N můžeme vyjádřit takto:

$$G_N = G_H + \Delta g'' - \overline{\Delta g''}, \quad (27)$$

kde G_H je hodnota vypočtená podle Helmerta – viz rovnici (23),

$\Delta g''$ je topografická redukce v bodě B ,

$\overline{\Delta g''}$ je topografická redukce středního tíhového zrychlení v tížnici bodu B .

Niethammerova výška H_N^B bodu B je pak definována vztahem

$$H_N^B = \frac{1}{G_N} \int_0^B g \, dh. \quad (28)$$

Použijeme-li opět označení c_B pro geopotenciální kótu bodu B , bude

$$H_N^B = \frac{c_B}{G_N}.$$

Niethammerovu ortometrickou korekci C_N můžeme v našem označení psát takto:

$$C_N = \frac{1}{G_N} \sum_0^B (g - G_N) \Delta h. \quad (29)$$

Výšky počítané podle Niethammera se velmi přibližují pravým ortometrickým výškám. V literatuře bývají nazývány také „pravými nadmořskými výškami“. Výpočet veličiny G_N je však pracný a zdlouhavý: území kolem bodu B je třeba rozdělit na prstence a sektory a počítat přitažlivost hmot, abychom mohli určit topografické opravy.

4.5 Minimálně redukované ortometrické výšky podle Ramsayera

Ortometrické opravy podle Helmerta a Niethammera se — jak jsme uvedli — jen málo liší od pravých ortometrických oprav. Opravy však dosahují ve středních výškách a zejména ve vysokých horách značných hodnot, takže výškové rozdíly naměřené (nivelované) se značně liší od výškových rozdílů, vypočtených z opravených a vyrovnaných výšek bodů. To ztěžuje používání těchto výšek v praxi — jsou pro technickou praxi nevhodné.

Ramsayer navrhl v publikaci [13] tíhovou korekci nivelačních výsledků, která dává přesně teoretický uzávěr pořadu a co nejméně mění výsledky měření. Do výpočtu korekce zavádí střední výšku nivelační sítě, což podstatně zmenšuje hodnoty korekci. „Minimální korekce“ se počítá podle vzorce

$$C_R = - \frac{1}{\gamma_{0,45}} \sum_{i=1}^n (\bar{z}_i - z_c) \Delta g'_{oi}, \quad (30)$$

kde $\gamma_{0,45}$ je normální tíhové zrychlení pro nulovou výšku a zeměpisnou šířku 45° ,

$\bar{z}_i = \frac{z_{i-1} + z_i}{2}$ je střední výška úseku,

z_c je zvolená střední výška nivelační sítě,

$\Delta g'_{oi}$ je rozdíl hodnot tíhových zrychlení, opravených podle Bouguera.

Podle Ramsayera byla počítána základní nivelační síť Bádenska-Württemberska a výsledky publikovány v r. 1957 — viz [14]. Střední výška z_c

byla zvolena 250 m, jak vyplývá pro celou západoněmeckou síť. V cit. publikaci se uvádí, že pro počítanou síť by byla vhodnější střední výška 350–400 m. To by ještě snížilo hodnoty korekcí.

Naměřená převýšení byla opravena také podle Helmerta, byly vypočteny normální ortometrické, dynamické a normální dynamické korekce. Pro zajímavost uvedu maximální a průměrné korekce nivelační sítě Bádenska-Württemberska podle publikace [14]:

| Druh korekce | K o r e k c e | |
|-------------------------|---------------|----------|
| | maximální | průměrná |
| | v milimetrech | |
| Dynamická | 146 | 32 |
| Normální dynamická | 121 | 28 |
| Helmertova | 47 | 16 |
| Normální ortometrická | 28 | 9 |
| Mínimální (Ramsayerova) | 32 | 6 |

Z tabulky je vidět, že průměrná korekce podle Ramsayera je nejmenší, a tedy nejméně mění výsledky měření. Výpočet korekcí je však dost pracný a založený na určitých předpokladech o hustotě zemské kůry.

5. „Normální“ výšky podle Moloděnského

Kromě Helmerta, Niethammera a Ramsayera navrhli další autoři způsoby pro výpočet korekcí nivelace, přihlížející ke skutečným tíhovým poměrům, a to za určitých hypotéz nebo bez nich.

V SSSR se nyní výšky počítají podle teorie M. S. M o l o d ě n s k é h o a tyto výšky se zavádějí také v naší nivelační síti. Moloděnskij navrhl (viz na příklad [9]) dosadit do rovnice (12) místo *skutečného* středního tíhového zrychlení G střední *normální* zrychlení γ_m^B . Tak dostaneme výšku bodu B , která byla nejprve nazvána „pomocná“, později „normální“. Označme ji H_M^B . Potom

$$H_M^B = \frac{1}{\gamma_m^B} \int_0^B g \, dh \quad (31)$$

Střední normální tíhové zrychlení γ_m^B se počítá stejně jako u normálních ortometrických výšek, tj. podle vzorce (19). Označíme-li γ_0^B normální tíhové zrychlení pro zeměpisnou šířku bodu B a nulovou výšku (z tabulek), můžeme psát:

$$\gamma_m^B = \gamma_0^B - 0,154 H^B mgl \quad (32)$$

a rovnici (31) takto:

$$H_M^B = \frac{1}{\gamma_0^B - 0,154 H^B} \int_0^B g dh. \quad (33)$$

Uvážíme-li opět geopotenciální kótu c_B bodu B , můžeme rovnici pro „normální“ výšku psát jednoduše

$$H_M^B = \frac{c_B}{\gamma_m^B}. \quad (34)$$

Srovnáme-li rovnici (31) pro „normální“ výšky s rovnicí (20) pro „normální ortometrické“ výšky, vidíme, že rovnici (31) dostaneme z rovnice (20), nahradíme-li normální tíhové zrychlení v bodech nivelačního pořadu γ hodnotami skutečnými g :

Vzorec pro „normální“ korekci C_M můžeme analogicky vzorci (21) psát ve tvaru:

$$C_M = \frac{1}{\gamma_m^B} \sum_0^B (g - \gamma_m^B) \Delta h. \quad (35)$$

Pišme rovnici (31) ve tvaru

$$H_M^B = \frac{1}{\gamma_m^B} \int_0^B \gamma dh + \frac{1}{\gamma_m^B} \int_0^B (g - \gamma) dh. \quad (36)$$

První člen na pravé straně rovnice (36) znamená „normální ortometrickou“ výšku bodu B – viz rovnici (20). Je tedy rozdíl ΔH „normální“ a „normální ortometrické“ výšky bodu B roven:

$$\Delta H = H_M^B - H_\gamma^B = \frac{1}{\gamma_m^B} \int_0^B (g - \gamma) dh, \quad (37)$$

kde $(g - \gamma)$ jsou rozdíly skutečné a normální tíže v bodech pořadu, tj. F a y e o v y anomálie.

Z uvedeného je zřejmé, že při výpočtu „normálních“ tíhových korekcí podle teorie Moloděnského se „normální ortometrická“ korekce doplňuje druhým členem, závislým na skutečném (měřeném) tíhovém zrychlení g (na Fayeových tíhových anomáliích). Střední tíhové zrychlení se

přítom počítá z Helmertova vzorce pro normální tíži, tedy bez hypotheses. To jsou hlavní přednosti „normálních“ výšek. Jsou to výšky, které odpovídají současnému stavu vědy a techniky a jejich zavedení v naší nivelační síti je nesporným pokrokem, i když se výpočet korekcí proti dosa-
vadnímu stavu poněkud komplikuje.

Je zajímavé, že ve Francii J. Vignal navrhl v roce 1952 stejně definované výšky jako Moloděnskij — viz [15]. Zvláštní komise pak doporučila přijetí Vignalových „ortodynamických“ výšek pro francouzskou nivelaci. Tyto výšky byly nazvány „altitudes rectifiées“ a jsou uváděny vzorcem

$$H_{\text{rect.}} = \frac{1}{\gamma_0 - 0,154 h} \int_0^A g dH, \quad (38)$$

kde h je výška bodu A v metrech,

γ_0 tíhové normální zrychlení v nulové výšce pro zeměpisnou šířku bodu A .

Vzorec Vignalův (38) je totožný se vzorcem Moloděnského (33). Je pravděpodobné, že J. Vignal neznal Moloděnského teorii. Protože však Moloděnskij uveřejnil své práce v letech 1945–1950, patří mu nesporně priorita návrhu.

5.1 Úprava vzorců pro výpočet „normálních“ výškových rozdílů

Rovnice (31), která definuje „normální“ výšku bodu B , je nevhodná pro praktické výpočty. V pojednáních [8] a [9] je navržena vhodná úprava vzorců.

Vyjděme z rovnice (20) pro „normální ortometrickou“ výšku H_{γ}^B bodu B a dosaďme identitu $\gamma = \gamma_m^B + (\gamma - \gamma_m^B)$. Tak dostaneme:

$$H_{\gamma}^B = \frac{1}{\gamma_m^B} \int_0^B (\gamma_m^B + \gamma - \gamma_m^B) dh = \int_0^B dh + \frac{1}{\gamma_m^B} \int_0^B (\gamma - \gamma_m^B) dh,$$

čili,

$$H_{\gamma}^B = H_{\text{métr.}}^B + \frac{1}{\gamma_m^B} \int_0^B (\gamma - \gamma_m^B) dh, \quad (39)$$

kde $H_{\text{métr.}}^B = \int_0^B dh$ je nivelovaná výška (součet nivelovaných převýšení).

V práci [9] je dokázáno, že v druhém členu na pravé straně rovnice (39) je

$$\int_0^B (\gamma - \gamma_m^B) dh = \int_0^B (\gamma_0 - \gamma_0^B) dh, \quad (40)$$

tj. hodnota integrálu se nezmění, dosadíme-li místo hodnot normálního tíhového zrychlení v odpovídajících nadmořských výškách hodnoty v nulové hladině γ_0, γ_0^B .

Rovnice (39) má potom tvar:

$$H_{\gamma}^B = H_{\text{m\ddot{e}r.}}^B + \frac{1}{\gamma_m^B} \int_0^B (\gamma_0 - \gamma_0^B) dh. \quad (41)$$

„Normální ortometrická“ výška H_{γ}^A sousedního bodu A bude obdobně:

$$H_{\gamma}^A = H_{\text{m\ddot{e}r.}}^A + \frac{1}{\gamma_m^A} \int_0^A (\gamma_0 - \gamma_0^A) dh. \quad (42)$$

Pro blízké body A, B můžeme v rovnicích (41) a (42) nahradit γ_m^A a γ_m^B jedinou hodnotou γ_m , počítanou pro střední zeměpisnou šířku a střední výšku bodů A, B . Potom, odečteme-li rovnici (42) od rovnice (41), dostaneme (po úpravě) pro rozdíl „normálních ortometrických“ výšek bodů A, B vzorec:

$$\begin{aligned} H_{\gamma}^B - H_{\gamma}^A &= H_{\text{m\ddot{e}r.}}^B - H_{\text{m\ddot{e}r.}}^A + \frac{1}{\gamma_m^B} \int_0^B (\gamma_0 - \gamma_0^B) dh - \\ &- \frac{1}{\gamma_m^A} \int_0^A (\gamma_0 - \gamma_0^A) dh - \frac{1}{\gamma_m^A} \int_0^A (\gamma_0^B - \gamma_0^A) dh. \end{aligned} \quad (43)$$

V rovnici (43) je

$$\frac{1}{\gamma_m^A} \int_0^A (\gamma_0^B - \gamma_0^A) dh = \frac{\gamma_0^B - \gamma_0^A}{\gamma_m} H_{\text{m\ddot{e}r.}}^A.$$

(γ_0^A a γ_0^B jsou pro zcela určité body A, B konstantní), a můžeme ji upravit takto:

$$H_{\gamma}^B - H_{\gamma}^A = \int_A^B dh + \frac{1}{\gamma_m} \int_A^B (\gamma_0 - \gamma_0^B) dh - \frac{1}{\gamma_m} (\gamma_0^B - \gamma_0^A) H_{\text{m\ddot{e}r.}}^A. \quad (44)$$

Rovnici (36) pro „normální“ výšku bodu B můžeme psát

$$H_{\text{m}}^B = H_{\gamma}^B + \frac{1}{\gamma_m} \int_0^B (g - \gamma) dh \quad (45)$$

a pro „normální“ výšku bodu A

$$H_M^\Lambda = H_\gamma^\Lambda + \frac{1}{\gamma_m} \int_0^\Lambda (g - \gamma) dh. \quad (46)$$

Odečteme-li rovnici (46) od rovnice (45) a přihlédneme-li k rovnici (44), dostaneme pro „normální“ výškový rozdíl bodů A, B vztah:

$$\begin{aligned} H_M^B - H_M^\Lambda &= \int_A^B dh + \frac{1}{\gamma_m} \int_A^B (\gamma_0 - \gamma_0^B) dh - \\ &- \frac{1}{\gamma_m} (\gamma_0^B - \gamma_0^\Lambda) \cdot H_{mzr.}^\Lambda + \frac{1}{\gamma_m} \int_A^B (g - \gamma) dh. \end{aligned} \quad (47)$$

V rovnici (47) je

$$\int_A^B dh \doteq \sum_A^B \Delta h = \Delta h_{BA},$$

což je výškový rozdíl z nivelace mezi body A, B . Zavedeme-li ještě střední hodnoty pro výpočet zbývajících dvou integrálů, dostaneme *konečný vzorec pro praktický výpočet „normálního“ výškového rozdílu* mezi body A, B :

$$H_M^B - H_M^\Lambda = \Delta h_{BA} - \frac{1}{\gamma_m} (\gamma_0^B - \gamma_0^\Lambda) H_m + \frac{1}{\gamma_m} (g - \gamma)_m \Delta h_{BA}. \quad (48)$$

Z rovnice (48) vyplývá pro „normální“ korekci nivelace C_M podle teorie Moloděnského:

$$C_M = - \frac{1}{\gamma_m} (\gamma_0^B - \gamma_0^\Lambda) H_m + \frac{1}{\gamma_m} (g - \gamma)_m \Delta h_{BA}. \quad (49)$$

V důležitých rovnicích (48) a (49) tedy znamená:

- H_M^B, H_M^Λ normální výšky bodů B, A ,
- Δh_{BA} naměřený výškový rozdíl mezi body B, A ,
- $\gamma_0^B, \gamma_0^\Lambda$ normální tíhové zrychlení, vypočtené z Helmertova vzorce pro zeměpisné šířky bodů B, A ,
- γ_m normální tíhové zrychlení, vypočtené pro střední zeměpisnou

šířku $\varphi_s = \frac{\varphi_B + \varphi_A}{2}$ a polovinu střední výšky H_m bodů B, A ,

tedy ze vzorce $\gamma_m = \gamma_0 \cdot \varphi_s - 0,154 H_m$,

H_m průměr výšek bodů B, A ,

$(g - \gamma)_m$ střední Fayeovu anomálii v úseku B, A . V praktických výpočtech lze s dostatečnou přesností počítat zpravidla tuto hodnotu jako aritmetický průměr Fayeových anomálií na bodech

$$B, A, \text{ tj. } (g - \gamma)_m \doteq \frac{(g - \gamma)_B + (g - \gamma)_A}{2}.$$

Vzorců tvaru (48) a (49) se používá v praxi a najdeme je v nejnovějších sovětských pracích a instrukcích, na příklad v [16] a [17].

Výpočet „normální“ opravy nivelace vyžaduje tedy znalost Fayeových anomálií, které se získají z gravimetrických map: na základě měřených hodnot tíhového zrychlení můžeme sestavit mapu Fayeových isanomál. Je-li k dispozici na příklad mapa isanomál Bouguerových, musíme tyto anomálie převést na Fayeovy (ve volném vzduchu).

5.2 Vztah mezi „normálními“ a „normálními ortometrickými“ korekcemi geometrické nivelace

Z rovnic (45) a (46) vyplývá pro rozdíl „normálního“ a „normálního ortometrického“ výškového rozdílu bodů B, A vzorec

$$\Delta C = \frac{1}{\gamma_m} \int_A^B (g - \gamma) dh,$$

který pro praktický výpočet upravíme na:

$$\Delta C \doteq \frac{1}{\gamma_m} (g - \gamma)_m \Delta h_{BA}, \quad (50)$$

kde jednotlivé veličiny jsou shodné s veličinami v rovnici (49).

Z rovnic (49) a (50) je zřejmé, že „normální“ korekce

$$C_M = C_\gamma + \Delta C. \quad (51)$$

Výškové rozdíly v jaderském systému (normální ortometrické) se tedy převedou na „normální“ (v baltském systému) připojením členu ΔC , který počítáme podle rovnice (50).

Abychom si učinili představu o tom, jakých hodnot dosahuje rozdíl „normální“ a „normální ortometrické“ opravy, dosaďme do vzorce (50)

značnou střední Fayeovu anomálii $(g - \gamma)_m = 100 \text{ mgl}$, dále $\gamma_m \doteq 981 \text{ gal}$ a $\Delta h_{BA} = 500 \text{ m}$. Výsledek dostaneme v milimetrech:

$$\Delta C = 50,97 \text{ mm} \doteq 5 \text{ cm.}$$

Pro $\Delta h_{BA} = 100 \text{ m}$ bude (za jinak stejných podmínek)

$$\Delta C \doteq 1 \text{ cm.}$$

Převýšení 500 m mezi nivelačními značkami není časté; Fayeovy anomálie jsou rovněž zpravidla menší. Rozdíl obou korekcí bude tedy jen výjimečně několik málo centimetrů, obvykle však nepřekročí několik milimetrů.

Závěrečné poznámky

V současné době (a v budoucnu tím více) rozsah gravimetrických měření umožňuje přihlížet k vlivu skutečného tíhového pole Země při výpočtu nivelací. Z gravimetrických a nivelačních měření na zemském povrchu lze snadno vypočítat geopotenciální kótu bodu B podle rovnice

$$c_B = \int_0^B g dh \doteq \sum_0^B g \Delta h.$$

Dělíme-li veličinu c_B konstantním tíhovým zrychlením, dostáváme dynamické výšky; dělíme-li skutečným středním tíhovým zrychlením v tížnici bodu B , dostáváme pravé (geoidické) ortometrické výšky. Protože skutečné střední tíhové zrychlení nedovedeme určit, nahrazujeme je hodnotou přibližnou, počítanou za určitých hypotéz nebo bez nich. Takto vypočtené výšky se budou lišit od výšek „geoidických“ (pravých „ortometrických“). Moderním požadavkům vědy a techniky zcela vyhovují „normální“ výšky.

M. S. Moloděnskij zavedl pomocnou plochu „quasigeoid“, který lze jednoduše definovat jako plochu vzdálenou od bodů na povrchu Země o hodnoty výšek vypočtených podle Moloděnského teorie. Z této teorie je zřejmé, že tam, kde skutečné střední tíhové zrychlení je rovno střednímu zrychlení normálnímu, ztotožňuje se quasigeoid s geoidem (na příklad na hladině moře). Tam, kde se obě uvedené střední hodnoty liší, odchyluje se quasigeoid od geoidu. Podle [9] dosahuje největší rozestup obou ploch hodnoty 2 m.

Moloděnského teorii lze rozšířit a obecně lze tvrdit, že všechny výšky, při jejichž výpočtu bylo skutečné střední tíhové zrychlení nahrazeno hod-

notou přibližnou, jsou „quasigeoidické“, a definovat pak quasigeoid Moloděnského, Helmerta, Niethammera atd.

Z uvedeného je dále zřejmé, že název „normální“ výšky pro výšky počítané podle teorie Moloděnského není právě výstižný. Moloděnskij sám říkal těmto výškám „pomocné“; název „normální“ byl zaveden později. V sovětské literatuře se nyní výšky třídí na dynamické, ortometrické a normální. To rovněž není výstižné. Výšky, které počítáme jen z normálních hodnot tíhového zrychlení (výšky jaderské) se budou zpravidla víc lišit od „geoidických“ výšek než výšky počítané podle Moloděnského (normální), a přece těmto výškám říkáme „normální ortometrické“. Vylučovat proto výšky podle Moloděnského z kategorie výšek ortometrických nepovažuji za správné. Otázka určitého sjednocení terminologie a pojmů však přesahuje rámec tohoto článku a budu ji řešit návrhem v časopise „Studia geophysica et geodaetica“.

Literatura:

- [1] Kruis, B.: Srovnávací studium nivelačních horizontů ČSR a okolních států. Geodetický a kartografický sborník 1957.
- [2] Ledersteger, K.: Einwägung und Schwere. Dreiecks- und Höhenmessung, Berlín 1940.
- [3] Helmert, F.: Die Schwerkraft im Hochgebirge. Veröff. des Preuss. Geodätischen Institutes, Berlín 1890.
- [4] Untersee, V.: Auf dem Wege zu einheitlichen europäischen Meereshöhen. Schweizerische Zeitschrift für Vermessung, Kulturtechnik und Photogrammetrie, č. 9, 1957.
- [5] Kneissl, M.: Die Bildung eines einheitlichen europäischen Nivellementsnetzes. Stuttgart 1955.
- [6] Ryšavý, J.: Vyšší geodesie, Praha 1947.
- [7] Bodemüller, H.: Beitrag zur Schwerekorrektion geometrischer Nivellements. Deutsche geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Heft Nr. 26, Mnichov 1957.
- [8] Jeremějev, V. F. — Zvonov, V. I.: O sistěmě vysot nivelirnoj seti SSSR. Trudy CNIIGAiK, vypusk 96, Moskva 1953.
- [9] Jeremějev, V. F.: Těoriija ortometričeskich, dinamičeskich i normalnych vysot. Trudy CNIIGAiK, vypusk 86, Moskva 1951.
- [10] Jessen, A.: Präzisionsnivellement und Schwere messung. Schweizerische Zeitschrift für Vermessung, Kulturtechnik und Photogrammetrie, č. 3, 1957.
- [11] Ledersteger, K.: Die einheitliche Begründung der metrischen Höhendefinitionen. Bulletin géodésique, č. 32, 1954.
- [12] Niethammer, Th.: Nivellement und Schwere als Mittel zur Berechnung wahrer Meereshöhen, Bern 1922.
- [13] Ramsayer, K.: Die Schwere reduction von Nivellements. Deutsche geodätische Kommission bei der Bayer. Akademie der Wissenschaften, Reihe A, Höhere Geodäsie, Veröff. Nr. 6, Mnichov 1953.

- [14] Ramsayer, K.: Schwerereduktion des Badisch-Württembergischen Haupthöhennetzes. Deutsche geodätische Kommission, Heft Nr. 22, Mnichov 1957.
- [15] Ramsayer, K.: Vergleich verschiedener Schwerereduktionen von Nivellements. Zeitschrift für Vermessungswesen, č. 5, 1954.
- [16] Entin, I. I.: Vysokotočnoje nivelirovanije. Trudy CNIIGAiK, vypusk 111, Moskva 1956.
- [17] Glavnoje upravlenije geodezii i kartografii: Instrukcija po nivelirovaniju I, II, III i IV klassov, Moskva 1955.
-

Theoretické základy měření délek elektromagnetickými vlnami

Úvod

Těsně před druhou světovou válkou se začal vyvíjet nový způsob měření vzdáleností elektromagnetickými vlnami. Rychle se rozvíjela tato metoda během války k válečným účelům. Po válce jí bylo použito k rozsáhlým mapovacím pracím, k založení velkých trilaterálních sítí, ke geodetickému spojení ostrovů a poloostrovů s kontinenty a p. Již nyní můžeme konstatovat, že nová metoda měření vzdáleností má dalekosáhlý význam pro geodesii, i když ještě není možné stanovit celý rozsah jejího použití pro mapování ve všech měřítkách, protože vývoj přístrojů není ani zdaleka ukončen. Vývoj probíhal ve dvou směrech. Z počátku se používalo přístrojů pracujících jen s radiovými vlnami. Známe je pod názvem radiolokátor nebo radar. Po druhé světové válce byly zkonstruovány přístroje pro měření vzdáleností pomocí světelných vln. Je charakteristické, že oba druhy přístrojů nebyly původně určeny pro geodetická měření. Radiové systémy sloužily a slouží především k navigaci letadel a lodí. Podobně i přístroj pro měření vzdáleností pomocí světla byl původně sestaven fyziky pro přesnější měření rychlosti světla.

Nová metoda měření vzdáleností elektromagnetickými vlnami úzce souvisí s rozsáhlým technickým oborem, elektrotechnikou, která byla dosud zeměměřiči opomíjena. Vliv elektrotechniky vzrůstá i na celou řadu dalších zeměměřických přístrojů. Stačí tu připomenout moderní počítačové stroje na děrné štítky, nebo vyvíjející se elektronkové počítačové stroje, astronomické přístroje atd.

V češtině není dosud odborný výraz pro novou metodu měření vzdáleností ustálen. V dosavadních publikacích se užívá název elektronkové nebo elektronické měření délek, čímž se rozumí měření délek elektronickými přístroji pracujícími s radiovými i světelnými vlnami. Pro měření délek světelnými vlnami se používá názvu elektrooptické nebo elektronicko-optické měření délek. Všechny tyto názvy jsou většinou překlady sovětských, anglických a německých názvů. Protože uvedené názvy buď nevyjadřují výstižně způsoby měření vzdáleností, anebo označují jen některé druhy přístrojů, používáme obecnějších názvů podle druhů vln. Název měření délek elektromagnetickými vlnami jednoznačně zahrnuje měření délek jak radiovými vlnami, tak i světelnými vlnami.

Měření délek elektromagnetickými vlnami umožňuje značně přesné měření prakticky libovolně velkých vzdáleností. Této metody se nyní používá k mapování ve spojení s fotogrammetrií ve všech světadílech, a to většinou v dosud nezmapovaných oblastech.

Měření délek pomocí elektromagnetických vln je založeno na jejich vlastnosti odrazet se od některých předmětů nebo látek a zachovávat směr a rychlost šíření. Při měření geodetických vzdáleností radiovými přístroji se nepoužívá odrazů ve vlastním slova smyslu, ale na koncovém bodě měřené délky je vyslaný signál zachycen přijímačem, je zesílen, případně vyslán na jiné nosné frekvenci a vrácen zpět k počátečnímu bodu; mluvíme o odraženém nebo ozvěnovém signálu. Schopnost odrazu radiových vln po prvé objevil v roce 1897 ruský vědec a vynálezce bezdrátového spojení radiem Popov. V době pokusů o vytvoření radiového spojení na Baltickém moři umístil Popov vysílač na můstku nákladní lodi Evropa a přijímač na křižníku Afrika. Pozoroval, že radiové spojení bylo vždy přerušeno, když mezi loděmi plula jiná loď. Přerušování trvalo tak dlouho, dokud loď byla na jedné přímce s oběma loděmi. Z tohoto úkazu Popov usuzoval, že kovová tělesa, jež jsou v cestě radiovým vlnám, odrážejí a rozptylují elektromagnetické vlny v prostoru, podobně jako lesklý povrch odráží světelné vlny. Po 25 letech, v roce 1922, pozorovali podobný úkaz američtí vědci Taylor a Joung, kteří zkoušeli radiové spojení přes řeku a zjistili, že při každém průjezdu parníku bylo spojení přerušeno. Teprve mnohem později bylo prakticky využito elektromagnetických vln k sestavení přístrojů k měření vzdáleností. Po prvé bylo použito radiových přístrojů k měření délek v geodesii v Sovětském svazu, kde v roce 1934 byl zkonstruován radiový dálkoměr, kterého bylo ještě před druhou světovou válkou použito k pokusnému zaměření sítě trigonometrických bodů. Měření vzdáleností bylo založeno na měření rozdílů fází vysílané a odražené vlny a změny kmítočtu. Ze sovětských vědců, kteří se zasloužili o vznik radiolokátoru, jsou nejznámější Rozing, Mandelštam, Papalexí, Vvedenskij, Sluckin, Sliozberg, Bonč-Brujevič, Alexejev, Maljarov atd. Během války byla konstruována řada přístrojů. Některé měřily vzdálenosti s takovou přesností, že mohly být přijaty jen s malými úpravami přímo pro měření délek v geodesii a pro určení polohy letadla při expozici leteckých snímků ve fotogrammetrii. Jsou to zejména radarové systémy Shoran a Decca, které dnes ve velké míře pomáhají geodetům a fotogrammetrům. Nyní se konstruuje radiové přístroje určené pro geodetická a topografická měření, od kterých můžeme očekávat opravdu vysokou přesnost. Radiové měření délek pro zhotovení podkladů

se plně osvědčilo a přešlo již ze stadia pokusných měření k plnému využití k mapování malých měřítek.

Myšlenka měření délek světelnými vlnami vznikala souběžně s prvními měřeními rychlosti šíření světla na konci minulého století. Je známo, že první pokusy měření rychlosti světla konal před více jak 100 lety v roce 1849 Fizeau pomocí rotujícího ozubeného kola. Možnosti měření délek však poskytovala teprve další přesnější měření rychlosti šíření světla, zejména měření Michelsonova. Michelson a Bowie v roce 1927 upozorňují, že je možno měřit vzdálenosti s relativní přesností, s jakou byla určena rychlost světla, a že bude možnost měřit pomocí světla i základny v hornatém území. Švédský profesor Bjerhammar označuje za vynálezce měření délek modulovanými světelnými vlnami Irvinga Wolffa, který ohlásil tuto metodu k patentování v roce 1939. Wolff popisuje několik konstrukcí dálkoměru. V roce 1956 byl však uveřejněn v časopise „Doklady akademiji nauk SSSR“, sv. 108, čís. 3 informativní článek o konstrukci přístroje pro měření délek, jehož prototyp byl vyroben již v roce 1936. Rozvoj těchto přístrojů spočíval hlavně v zlepšování zařízení pro modulaci světla a přesnosti odečítání měřených hodnot. Základní součástí přístrojů je modulátor, který amplitudově moduluje vlny. Fizeau moduloval světlo mechanickými prostředky. Teprve Karolus a Mittelstädt zlepšili modulaci světelných vln použitím Kerrovy buňky jako modulátoru, a tím se samozřejmě zvýšila i přesnost určení rychlosti světla. K dalšímu zlepšení měření rychlosti světla přispěl Hüttel. Největších úspěchů po druhé světové válce dosáhl švédský vědec Bergstrand, který zkonstruoval dosud nejlepší a nejpřesnější přístroj, původně určený k měření rychlosti světla, nazývaný dnes Bergstrandův geodimetr.

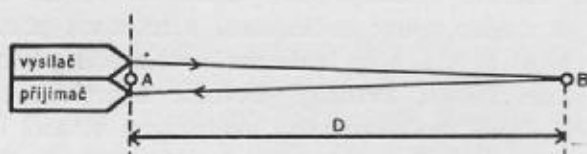
Nyní se již vyrábějí další druhy dálkoměrů. Největší úspěchy ve výzkumu světelných dálkoměrů má Sovětský svaz, Švédsko a Západní Německo. V těchto zemích bylo vyvinuto několik různých prototypů.

Lze očekávat, že přístroje pro měření délek světelnými vlnami již brzy budou mít takové vlastnosti, jaké od nich žádá praxe. Jsou to především: malá váha přístroje a zdroje elektrické energie, jednoduchá manipulace s přístrojem a jeho spolehlivost při zachování dostatečné přesnosti měření.

I. Elektromagnetické vlnění

Elektromagnetické vlny charakterisují elektromagnetické pole, které se šíří od zdroje záření elektromagnetické energie na všechny strany. Elektromagnetické vlny se pohybují velikou rychlostí, téměř 300 000 km za vteřinu. Vyzařovaná energie se šíří do prostoru v kulových vlnoplo-

chách, jež jsou souborem míst, do nichž se vlna rozšířila za stejnou dobu; tvoří tedy plochu stejné fáze vlny. Směr šíření je kolmý k vlnoplochám. Šíření elektromagnetických vln je možno definovat jako periodickou variaci elektrického a magnetického pole, měnícího se podle sinusoidálního zákona. Nejúčinnějším zdrojem záření elektromagnetické energie je otevřený kmitavý okruh, který nazýváme antenou. Nejjednodušším typem takového otevřeného obvodu je antena nazývaná dipol.



Obr. 1.

Elektromagnetické vlny dělíme na vlny radiové, na tepelné záření, vlny světelné, paprsky X a gama a konečně záření penetrantní. Radiové vlny se dále dělí na dlouhé, střední, krátké, Hertzovery a ultrakrátké. Světelné vlny obsahují kromě viditelného světla ještě paprsky infračervené a ultrafialové. Stručný přehled o rozdělení vln a příslušných vlnových délek, po případě kmitočtů, podává tabulka I.

Z uvedených druhů vln se nejlépe hodí pro měření délek vlny radiové a světelné. Nelze použít vln kratších vlnových délek pro jejich silnou absorpci, tepelných paprsků pro malou citlivost přístrojů a nízkofrekvenčních radiových vln pro příliš velkou vlnovou délku.

Měření elektromagnetickými vlnami spočívá v podstatě u všech přístrojů na přímém nebo nepřímém měření času. U mnoha radiových systémů se měří přímo krátký časový interval t , za který proběhnou elektromagnetické vlny vzdálenost D tam a zpět (viz obr. 1). Jestliže označíme rychlost šíření vln v , pak platí vztah

$$2D = v \cdot t \quad (1)$$

Při měření délek světelnými vlnami se u většiny přístrojů určuje vzdálenost nepřímým měřením času

II. Šíření elektromagnetických vln

V homogenním isotropním prostředí se šíří elektromagnetické vlny stejnou rychlostí ve všech směrech a přímočaře. Vzduch obklopující Zemi je však prostředí různorodé a značně proměnlivé, zvláště v nej-

TABULKA I — Rozdělení elektromagnetických vln

| Vlnová délka | Frekvence | Druh vln a paprsků | | |
|--------------|-----------------------|---|-------------------------------|------------------|
| 10 km | 30 kHz | Radiové vlny | Dlouhé vlny | |
| 1 km | 300 kHz | | | Střední vlny |
| 100 m | 3 MHz | | | |
| 10 m | 30 MHz | | Krátké vlny | Rozhlasové vlny |
| 1 m | 300 MHz | | Hertzovy vlny | |
| 10 cm | $3 \cdot 10^3$ MHz | | Ultrakrátké vlny Mikrovlny | |
| 1 cm | $3 \cdot 10^4$ MHz | | | |
| 1 mm | $3 \cdot 10^5$ MHz | Tepelné záření | | |
| 100 μ | $3 \cdot 10^6$ MHz | Světlo | Infračervené paprsky | |
| 10 μ | $3 \cdot 10^7$ MHz | | | Viditelné světlo |
| 1 μ | $3 \cdot 10^8$ MHz | | | |
| 1000 Å | $3 \cdot 10^9$ MHz | | | |
| 100 Å | $3 \cdot 10^{10}$ MHz | Záření X (Roentgenovy paprsky) | | |
| 10 Å | $3 \cdot 10^{11}$ MHz | | | |
| 1 Å | $3 \cdot 10^{12}$ MHz | | | |
| 100 X | $3 \cdot 10^{13}$ MHz | Paprsky γ | | |
| 10 X | $3 \cdot 10^{14}$ MHz | | | |
| 1 X | $3 \cdot 10^{15}$ MHz | Penetrantní záření (ultragama) (elektromagnetická složka kosmického záření) | | |
| 0,1 X | $3 \cdot 10^{16}$ MHz | | | |
| 0,01 X | $3 \cdot 10^{17}$ MHz | | | |
| 0,001 X | $3 \cdot 10^{18}$ MHz | | | |

spodnějších vrstvách blízko povrchu Země. Změny prostředí mají vliv především na šíření radiových vln. Vznikají tak různé nepříznivé zjevy, které ovlivňují přesnost měření a někdy dokonce měření znemožňují.

Radiové vlny určitých frekvencí se odrážejí od ionosféry nebo od povrchu Země, takže často dochází k interferenci vlny šířící se přímo s vlnou odraženou. Prochází-li paprsky blízko povrchu Země, vzniká difrakce, jíž se snižuje síla elektromagnetického pole. U ultrakrátkých vln kratších než 10 cm dochází k silné absorpci, kterou zvláště způsobuje kyslík, vodní páry a dešťové kapky. Vlivem refrakce se paprsky radiových vln zakřivují podobně jako světelný paprsek. Největší nesnáze při měření délek působí proměnlivá rychlost elektromagnetických vln.

Přesnost měření délek světelnými vlnami je dána přesností měřené veličiny (frekvence, fázového rozdílu atd.) a kromě toho závisí jen na správné znalosti rychlosti šíření světelných vln a na jejich refrakci případně na atmosférické absorpci. Proto převážná část této kapitoly je věnována šíření radiových vln, na které působí mnohem více vlivů.

Světelné vlny mají proti radiovým vlnám určité přednosti a jsou proto k měření délek výhodnější. Dráha světelných paprsků je méně zakřivena a jejich rychlost se mění vlivem různých vzduchových vrstev v mnohem menší míře. Kromě toho můžeme světelné paprsky snadno soustřeďovat vhodným optickým systémem. Nemusíme počítat s odrazem vln od Země a ionosféry. Také difrakce je bezvýznamná. Konečně je známo, že dráha světelných paprsků a jejich rychlost je mnohem lépe prozkoumána.

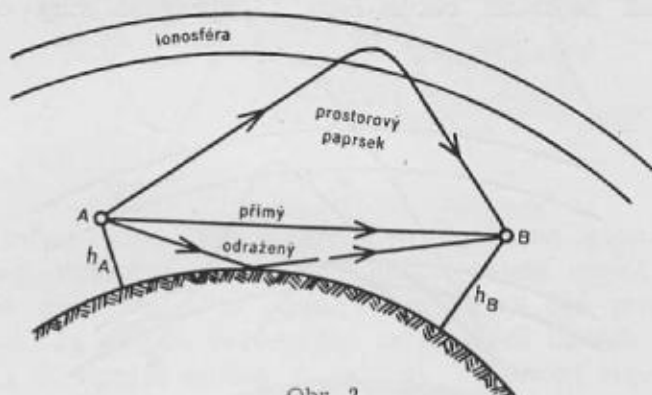
Radiových vln se používá jen v určitém rozsahu. Většina přístrojů pro měření délek pracuje s ultrakrátkými vlnami v rozmezí vlnových délek asi od 1 až 2 cm do 10 m. Středních a dlouhých vln se používá často k měření rozdílů vzdáleností.

Ultrakrátké vlny mají proti světelným vlnám tu výhodu, že jejich modulování je podstatně jednodušší. Centimetrové vlny nejsou prakticky rušeny žádnými jinými vlnami, kdežto světelné vlny jsou silně ovlivňovány denním světlem. Dosah centimetrových vln je větší a zvláště přijímače mají velkou citlivost. Ultrakrátké vlny se jen v nepatrné míře odrážejí od ionosféry a od povrchu Země, takže téměř neruší příjem přímé vlny.

Spodní hranice délky radiových vln pro měření vzdáleností se udává asi kolem dvou centimetrů, protože u kratších vlnových délek nastává značné rušení příjmu odražením vln již malými částicemi prachu, dešťovými kapkami atd., takže není dosaženo spolehlivého výsledku měření.

Ultrakrátkými vlnami mohou být měřeny vzdálenosti až několik set kilometrů. Tyto vlny se svými vlastnostmi velmi blíží světelným vlnám.

Dlouhé radiové vlny jsou vhodné pro měření velkých vzdáleností, zejména na moři. Protože se dlouhé vlny odrážejí od ionosféry a od povrchu Země, je přesnost měření nižší než u ultrakrátkých vln. S výhodou se používá středních a dlouhých vln pro zjištění polohy letounů a lodí a k jejich navigaci určováním rozdílu vzdáleností od různých dvojic radiolokačních pozemních stanic. To má také velký význam pro fotogrammetrické mapování.



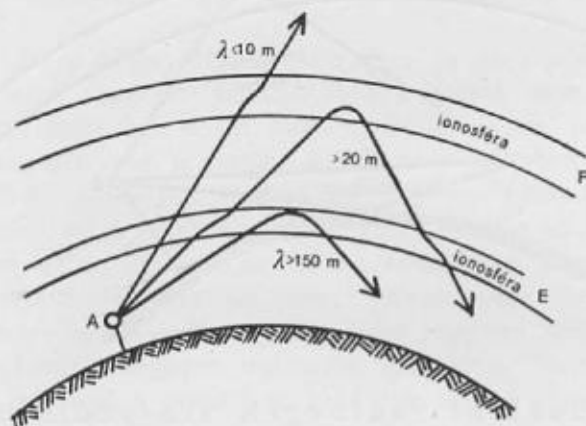
Obr. 2.

1. Rozdělení radiových vln podle dráhy jejich šíření

Radiové vlny se šíří všemi směry a některé z nich se odrážejí od povrchu Země a od ionosféry, takže mohou probíhat z místa zdroje vlnění do druhého bodu umístěného nad povrchem zemským různými drahami (viz obr. 2). Podle těchto drah dělíme radiové paprsky na dvě základní skupiny [3]: na prostorové (ionosférické) paprsky, které se po odrazu od ionosféry vracejí zpět k povrchu Země, a na povrchové paprsky šířící se podél povrchu Země v troposféře. Povrchové paprsky jsou buď přímé paprsky šířící se po nejkratší dráze, nebo odražené paprsky, které se odrážejí od zemského povrchu.

Prostorové vlny. Ionosféra se dělí na několik vrstev označovaných písmeny. Výška jednotlivých vrstev se mění a kolísá s denní dobou. Jaký vliv mají vrstvy ionosféry na radiové vlny, ukazuje obr. 3. Dlouhé vlny se ve vrstvách ionosféry postupně ohýbají a vracejí směrem k Zemi. Čím mají vlny větší délku, tím více se lámou a výška vrcholu jejich dráhy je menší. Protože ohyb paprsků je velký, mluvíme

obvykle o odrazu. Vlny kratších vlnových délek (asi od 10 m níže) se v ionosféře nepatrně lomí, procházejí ionosférou a postupují dále do prostoru, takže se již k Zemi nevrátí. To je jeden z důvodů, proč se volí pro měření vzdáleností ultrakrátké vlny. Dlouhé vlny vlivem odrazu od ionosféry nejsou pro přesné měření vzdáleností vhodné. Používá se jich však s výhodou u některých radiových přístrojů, které měří rozdíl vzdáleností od dvou pevných bodů, a k měření velkých vzdáleností, přesahujících značně dosah přístrojů pracujících s ultrakrátkými vlnami. K přesnějším měřením se volí taková prostorová vlna, která vykoná nejkratší cestu. Jsou to zpravidla vlny odražené od vrstvy E.



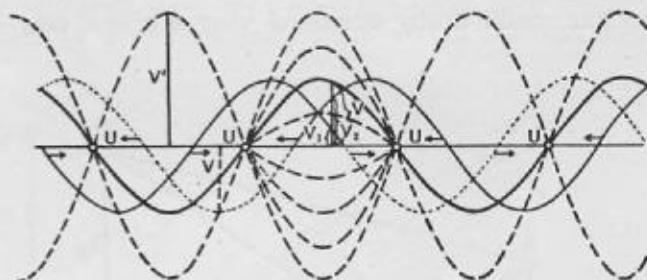
Obr. 3.

Povrchové vlny. Pro měření délek v geodesii se používá přímých paprsků, které zaručují největší přesnost měření. Přímý paprsek ultrakrátkých vln probíhá po zakřivené dráze blízké dráze světelných paprsků. Kromě přímých paprsků vyskytují se někdy paprsky odražené od zemského povrchu. Odražené paprsky probíhají samozřejmě po delší dráze. Rozdíl délek drah se snižuje s rostoucí vzdáleností. Intenzita odražené vlny závisí na délce radiové vlny, na tvaru zemského povrchu a jeho vlastnostech.

2. Interference elektromagnetických vln

Přístroje pro měření délek elektromagnetickými vlnami vysílají vlny z počátečního bodu do koncového bodu, kde se odrazí a vracejí zpět do počátečního bodu. V místech, kde se odražená vlna šíří také po dráze

vysílané vlny, obě vlny spolu interferují. V každém místě společné dráhy vzniká v zjednodušeném grafickém vyjádření periodického kmitavého pohybu nová výchylka v' , rovnající se geometrickému součtu výchylek v_1 a v_2 obou vln vzniklých v daných bodech v témže čase t (viz obr. 4).



Obr. 4.

Vlivem interference dvou stejných vln opačného směru vytváří se při neměnném kmitočtu na společné dráze stojaté vlnění. Na obr. 4 je znázorněn vznik stojatého vlnění, které dávají obě proti sobě postupující vlny. Je zřejmé, že se vždy na stejných bodech tvoří místa, kde výchylka v' zůstává nulová, t. zv. uzly. Uprostřed mezi uzly vznikají maximální výchylky a frekvence vlnění je totožná s frekvencí obou vln. (Prakticky je však interference elektromagnetických vln jevem mnohem složitějším.)

Uzly jsou ostré jen v tom případě, když postupující vlna a odražená vlna mají stejnou amplitudu V . Při rozdílné amplitudě jsou uzly neostré. Ostré uzly obdržíme pro malé vzdálenosti a pro vlny soustředěné v úzký svazek.

Interference, vznikající v místech společné dráhy vlny vysílané a vlny odražené od koncového bodu měřené délky, nemá vlivu na vlastní měření vzdáleností.

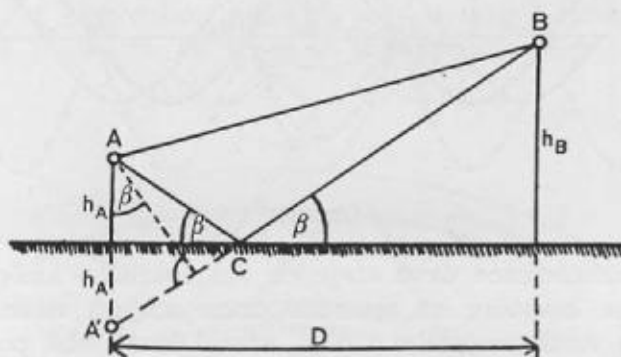
Interference dvou stejnosměrných vln je popsána v dalším odstavci.

3. Odraz radiových vln od povrchu Země

Jestliže elektromagnetická vlna narazí na vrstvu, jejíž charakteristika se liší od charakteristik prostředí, v němž se šířila dříve, dochází k odrazu, případně lomu. Takovou vrstvu tvoří i povrch Země. Odráží-li povrch Země vysílanou radiovou vlnu, může zasahovat cíl vlna přímá i odražená. Protože obě dráhy při měření větších vzdáleností jsou prakticky rovnoběžné, dochází k interferenci radiových vln. Podle rozdílu

dělek obou drah vzhledem k vlnové délce radiových vln mohou se obě vlny navzájem buď zesilovat nebo zeslabovat.

a) Odraz radiových vln do roviny. Za předpokladu, že terén, od něhož se odrážejí radiové vlny, je rovinný, antena je umístěna ve výšce h_A a výška cíle na koncovém bodě měřené délky je h_B můžeme vypočítat rozdíl dráhy odražené vlny a přímé vlny ΔD ze vztahu (viz obr. 5).



Obr. 5.

$$\Delta D = \overline{AC} + \overline{CB} - \overline{AB} \quad (2)$$

Označíme-li vodorovnou vzdálenost bodů A, B písmenem D , pak platí (viz [4])

$$\overline{AC} + \overline{CB} = \sqrt{D^2 + (h_A + h_B)^2} \doteq D \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{h_A + h_B}{D} \right)^2 \right] \quad (3)$$

$$\text{a} \quad \overline{AB} = \sqrt{D^2 + (h_A - h_B)^2} \doteq D \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{h_A - h_B}{D} \right)^2 \right]; \quad (4)$$

z toho

$$\Delta D = \frac{(h_A + h_B)^2 - (h_A - h_B)^2}{2D} = \frac{4h_A h_B}{2D} = 2 \frac{h_A h_B}{D} \quad (5)$$

Je-li úhel odrazu β dostatečně malý, můžeme rozdíl dráhy radiových vln vyjádřit vztahem

$$\Delta D \doteq 2 h_A \sin \beta. \quad (6)$$

Fázový rozdíl $\Delta \varphi$ paprsku odraženého a přímého je dán výrazem

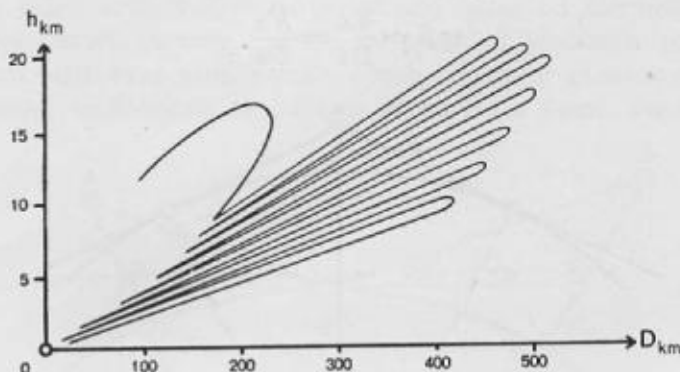
$$\Delta \varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta D \doteq \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{h_A h_B}{D}. \quad (7)$$

Fázový rozdíl se mění u pohyblivého cíle s výškou h_B a vzdáleností D

od 0° do 360° . K celkovému fázovému rozdílu je nutno připočíst změnu fáze, k níž došlo při odrazu od roviny, takže konečný fázový rozdíl

$$\Delta\Phi = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{h_A h_B}{D} + \delta. \quad (8)$$

Mění-li se výška cíle h_B , dochází vlivem interference k plynulým změnám intenzity elektromagnetického vlnění od maximálních k mini-



Obr. 6.

málním hodnotám a naopak. Maximální zesílení vysílané přímé radiové vlny nastává, jsou-li fáze obou vln stejné (výsledný fázový rozdíl je roven celému násobku 360°). Je-li fázový rozdíl roven lichému násobku 180° , obě vlny se vzájemně ruší. V místech, kde se vlna vysílaná a odražená ruší, je intenzita elektromagnetického pole nulová, a tak u vertikálního vyzářovacího diagramu anteny vznikají lalokovité plochy, vyznačující místa dosahu elektromagnetických vln, jež oddělují oblasti, v nichž se vlny navzájem ruší. Příklad vertikálního vyzářovacího diagramu je uveden na obr. 6 pro výšku anteny $h = 30$ m a frekvenci $f = 3$ kHz.

b) Odras od kulového povrchu. Protože povrch Země je zakřivený, je šíření radiových vln omezeno horizontem (viz obr. 7). Horizont radiových vln je dán body dotyku šířících se paprsků se zemským povrchem. Za předpokladu, že paprsky jsou přímočaré, bude vzdálenost horizontu dána vztahem

$$D = \sqrt{(R + h)^2 - R^2} = \sqrt{2Rh + h^2} \approx \sqrt{2Rh}, \quad (9)$$

kde R je poloměr Země a h výška anteny.

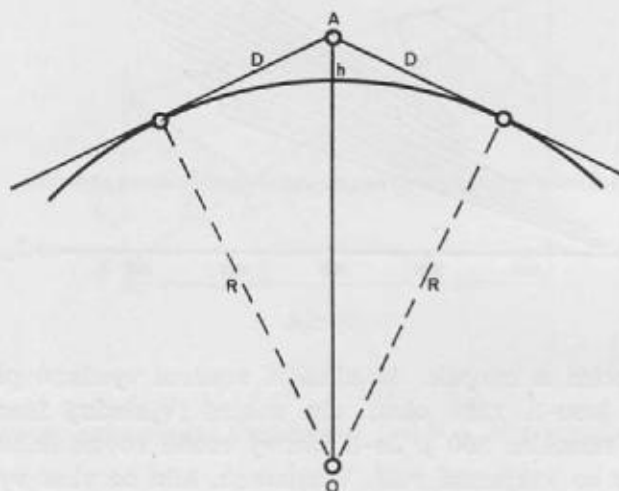
Bod B není vzhledem k bodu A pod horizontem, jestliže jejich vzdálenost bude maximálně (viz obr. 8)

$$(D_A + D_B) \doteq \sqrt{2R} (\sqrt{h_A} + \sqrt{h_B}). \quad (10)$$

Tato rovnice platí jen přibližně, protože radiové vlny se vlivem refrakce zakřívují, takže horizont radiových vln leží ve větší vzdálenosti.

Do bodů, jejichž vzdálenost je menší než udává rovnice (10), mohou se elektromagnetické vlny šířit nejen přímo, ale také odrazem od povrchu Země (viz obr. 8). Bod, v němž dochází k odrazu, se může přibližně stanovit ze vztahu [4].

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{h'_A}{D_A} = \frac{h'_B}{D_B}. \quad (11)$$



Obr. 7.

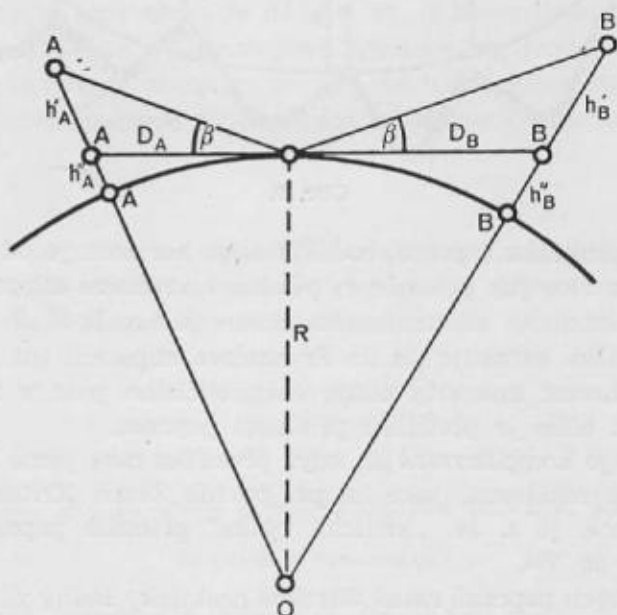
$$\begin{aligned} \text{Výšky bodů } A, B \text{ jsou: } h_A &= h'_A + h''_A, \\ h_B &= h'_B + h''_B, \end{aligned} \quad (12)$$

kde $h''_A \doteq \frac{D_A^2}{2R}$ a $h''_B \doteq \frac{D_B^2}{2R}$. Podle rovnice (11) bude

$$\frac{h_A - \frac{D_A^2}{2R}}{D_A} = \frac{h_B - \frac{D_B^2}{2R}}{D_B} \quad (13)$$

Všechny úvahy o odrazu radiových vln zatím předpokládaly, že odraz se děje na ideální rovině nebo kulové ploše. Ve skutečnosti však členitost povrchu Země a jeho vlastností rozptylují odražené vlny do různých směrů. Tak na př. při malých úhlech β není odraz ultrakrátkých vln kratších než 10 cm od normálního povrchu Země vůbec pravděpodobný.

Odraz delších vln pak působí většinou rušivě a snižuje přesnost měření. Prakticky lze využít odrazu pro zesílení intenzity šířících se radiových paprsků na mořské hladině asi od vlnové délky 20 m a na povrchu Země asi od vlnové délky 300 m, případně až 12 000 m, podle vlhkosti půdy (viz [3]). Jinak se terén v okolí anteny musí pro získání odrazu upravit. I při těchto délkách vln se v běžném terénu ukazuje, že použití odrazu není k měření vzdáleností příliš vhodné. Odrazy jsou nepravidelné a předem se těžko určí. Rušivě na př. působí odraz od zemského povrchu, jehož porost tvoří stromy a keře. Naopak za ideálních podmínek se může pomocí odražené vlny zvětšit dosah přístrojů až dvojnásobně. Pro přesné měření vzdáleností se odrazu od povrchu Země nepoužívá.



Obr. 8.

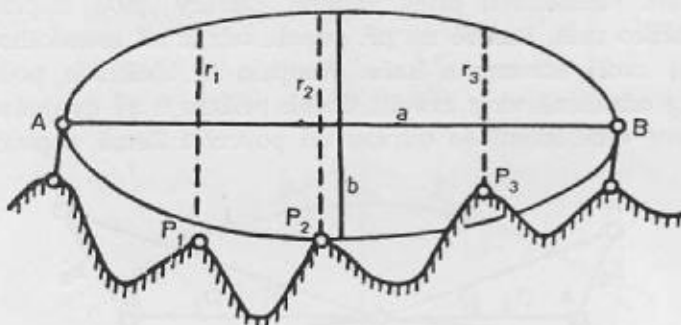
4. Difrakce

Je-li dráha přímého paprsku blízko horizontu nebo nějaké překážky, snižuje se intenzita elektromagnetického pole a dochází k zjevu, kterému říkáme difrakce. Jestliže přímý paprsek probíhá v malé výšce nad překážkou, mluvíme o difrakci spodní, v případě, že přímý paprsek tuto překážku protíná, nazýváme ji difrakcí horní. Difrakce je zjev značně složitý. Kriterium pro zjištění, kdy dochází k difrakci, je dáno t. zv. Fresnelovým elipsoidem (viz obr. 9). Hlavní osu rotačního Fres-

nelova elipsoidu tvoří měřená délka \overline{AB} . Průsečnice plochy elipsoidu s rovinami kolnými k jeho hlavní ose jsou kružnice. Libovolný bod P takové kružnice na elipsoidu je definován rovnicí (viz [4])

$$\overline{AP} + \overline{PB} = \overline{AB} + \frac{\lambda}{2}, \quad (14)$$

kde λ je délka vlny.



Obr. 9.

Jestliže překážka (na obr. bod P_1) nebo horizont je od přímého paprsku vzdálen více jak poloměr r_1 příslušné kružnice elipsoidu, difrakce nenastává a intenzita elektromagnetického pole v bodě B se nezmění. Jestliže překážka zasahuje již do Fresnelova elipsoidu (na obr. bod P_3), působí zmenšování intenzity elektromagnetického pole v bodě B , a to tím více, čím blíže je překážka přímému paprsku.

Difrakce je komplikovanější, když překážka není jasně oddělena, ale je jen trochu zakřivená, jako na př. povrch Země. Kriterium pro působení difrakce, je t. zv. „kritická výška“ přímého paprsku vzhledem k Zemi: $h = 50 \lambda^{2/3}$.

U světelných paprsků nemá difrakce prakticky žádný vliv na přesnost měřené vzdálenosti. Vlnová délka světla je malá, takže Fresnelův elipsoid je velmi úzký a k difrakci nedochází ani v malé výšce paprsku nad terénem.

5. Atmosférické absorpce

U některých elektromagnetických vln nastává v určitém prostředí značná absorpce. Tato absorpce je tak velká, že znemožňuje prakticky měřit vzdálenosti radiovými vlnami, jejichž vlnová délka je menší než 1 cm (2 cm). Silnou absorpcí těchto vln působí větší obsah kyslíku, vodní páry, malé částičky prachu přítomné ve vzduchu, dešťové kapky atd. Dešťové kapky jednak absorbují ultrakrátké vlny, jednak část

energie odrážejí a rozptylují. U radiových vln nad 3 cm působí poruchy jen silné deště a tropické lijáky. Částečného odrazu ultrakrátkých vln využívá letecká meteorologická služba. Dešťové fronty se objeví na obrazovce indikátoru radarového přijímače jak skvrny. Letouny tak mají možnost vyhnout se bouřkovým oblastem.

6. Refrakce – atmosferický lom

Procházejí-li elektromagnetické vlny homogenním a isotropním prostředím, šíří se přímočaře. Mění-li se prostředí a jeho vlastnosti, paprsky se lámou. Refrakce všech druhů elektromagnetických vln je obdobná jako u vln světelných. Míra lomu je dána t. zv. indexem lomu, který je poměrem rychlosti šíření elektromagnetických vln ve dvou sousedních prostředích. Rozeznáváme absolutní a relativní index lomu. Absolutní index lomu N je poměr rychlosti šíření vlnění ve vakuu a v určitém prostředí:

$$N = \frac{c}{v}. \quad (15)$$

Relativní index lomu n vyjadřuje poměr rychlosti elektromagnetických vln ve dvou obecných prostředích a je převráceným poměrem jejich absolutních indexů lomů:

$$n = \frac{v_1}{v_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{\frac{c}{v_2}}{\frac{c}{v_1}} \quad (16)$$

Index lomu je dán podle Snelliova zákona (viz obr. 10):

$$na \cos \varphi = n_0 a_0 \cos \varphi_0, \quad (17)$$

kde a, a_0 jsou vzdálenosti bodů P, P_0 od středu Země O , případně od průsečíků normál (na povrchu Země $a_0 \doteq R$); n, n_0 jsou relativní indexy lomu a φ, φ_0 jsou úhly, které svírá paprsek v bodech P, P_0 s tečnou v těchto bodech. Indexy lomu závisí na vlastnostech vrstev vzduchu, na jeho složení a hustotě. Tyto faktory se mění nejen s místem (se změnou výšky), ale také s časem, protože působením různých vlivů se vzdušné vrstvy stále pohybují a vzájemně míchají. Za ideálního stavu atmosféry se mění index lomu pravidelně se stoupající nadmořskou výškou.

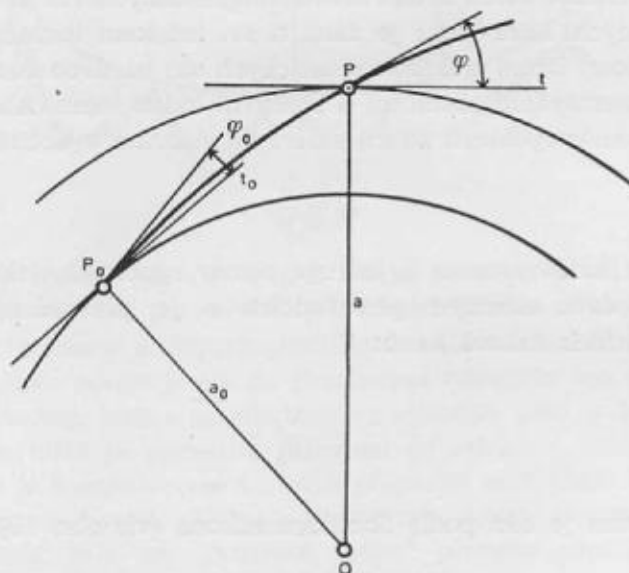
Index lomu závisí také na délce elektromagnetických vln. Proto jsou rozdílné dráhy světelných a radiových vln. Na př. závislost indexu lomu na vlnové délce λ viditelné části světelných vln je dána vztahem Cauchyho

(viz [8]), který platí v podmínkách geometrické optiky při tlaku vzduchu 760 mm Hg, pro suchý vzduch a teplotu $t = 15^\circ$:

$$N - 1 = A + \frac{3B}{\lambda^2} + \frac{5C}{\lambda^4}, \quad (18)$$

kde A, B, C jsou konstanty.

Refrakce je hlavně patrna u paprsků, jež svírají s tečnou povrchu Země malý úhel. Podobné podmínky nastávají při měření vzdáleností elektromagnetickými vlnami v geodesii, kdy paprsky jsou jen málo odkloněny od povrchu Země. V takovém případě můžeme zákon Snelliův upravit a položit (viz [4])



Obr. 10.

$$\begin{aligned} n &= 1 + c, \quad a = R \left(1 + \frac{h}{R} \right), \quad \cos \varphi = 1 - \frac{\varphi^2}{2}, \\ n_0 &= 1 + c_0, \quad a_0 = R \left(1 + \frac{h_0}{R} \right), \quad \cos \varphi_0 = 1 - \frac{\varphi_0^2}{2}, \end{aligned} \quad (19)$$

kde $c, c_0, \frac{h}{R}, \frac{h_0}{R}, \frac{\varphi^2}{2}, \frac{\varphi_0^2}{2}$ jsou vzhledem k jedničce malé hodnoty.

Zanedbáním výrazů druhého řádu a dosazením do rovnice (17) bude

$$\left(n - 1 + \frac{h}{R} \right) - \left(n_0 - 1 + \frac{h_0}{R} \right) = \frac{\varphi^2}{2} - \frac{\varphi_0^2}{2} \quad (20)$$

nebo

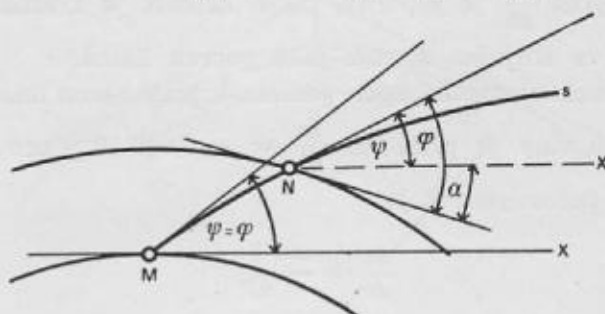
$$n - n_0 + \frac{h - h_0}{R} = \frac{\varphi^2}{2} - \frac{\varphi_0^2}{2}. \quad (21)$$

Prakticky je nejdůležitější ten případ, kdy změna indexu lomu n probíhá lineárně s výškou, takže

$$n - n_0 + \frac{dn}{dh} \Delta h. \quad (22)$$

Položíme-li

$$n - n_0 = \frac{dn}{dh} \Delta h, \quad \frac{dn}{dh} + \frac{1}{R} = \frac{1}{K \cdot R},$$



Obr. 11.

dostaneme

$$\left(\frac{dn}{dh} + \frac{1}{R} \right) \Delta h = \frac{1}{2} (\varphi^2 - \varphi_0^2) = \frac{\Delta h}{K \cdot R}. \quad (23)$$

Z tohoto vzorce můžeme vypočíst K , určíme-li experimentálně hodnotu $\frac{dn}{dh}$.

$$K = \frac{1}{R \frac{dn}{dh} + 1}. \quad (24)$$

Pro malé úhly ψ , které svírá paprsek s tečnou rovinou vzhledem k povrchu Země (viz obr. 11), bude křivost paprsku

$$\frac{1}{\rho} = - \frac{d\psi}{ds} = - \frac{d\psi}{dx}. \quad (25)$$

Protože

$$d\psi = d\varphi - d\alpha,$$

můžeme psát

$$\frac{1}{\rho} = - \frac{d\varphi}{dx} + \frac{d\alpha}{dx}; \quad (26)$$

dále

$$\frac{d\varphi}{dx} = \frac{d\varphi}{dh} \frac{dh}{dx} = \frac{d\varphi}{dh}, \quad \varphi = \frac{1}{2} \frac{d(\varphi^2)}{dh} \quad (27)$$

$$a \quad \frac{da}{dx} = \frac{1}{R}, \quad (28)$$

kde $\frac{1}{R}$ je zakřivení zemského povrchu.

Dosazením do rovnice (26) dostáváme podle rovnice (23) pro křivost paprsku

$$\frac{1}{\rho} = -\frac{1}{2} \frac{d(\varphi^2)}{dh} + \frac{1}{R} = -\frac{dn}{dh}. \quad (29)$$

Obvykle výraz $\frac{dn}{dh}$ je záporný, takže křivost je kladná. Paprsek je tedy zakřiven ve stejném smyslu jako povrch Země.

Za normálních atmosférických podmínek platí zákon lineárních změn. Pro ultrakrátké vlny je přibližně $\frac{dn}{dh} = -0,039 \cdot 10^{-6}$ pro 1 m výšky. Ve srovnání s poloměrem R je

$$\frac{dn}{dh} \doteq -\frac{1}{4R}$$

a z toho plyne

$$\frac{dn}{dh} + \frac{1}{R} = \frac{3}{4R} \left(= \frac{1}{K \cdot R} \right), \quad (30)$$

takže $K = \frac{4}{3}$.

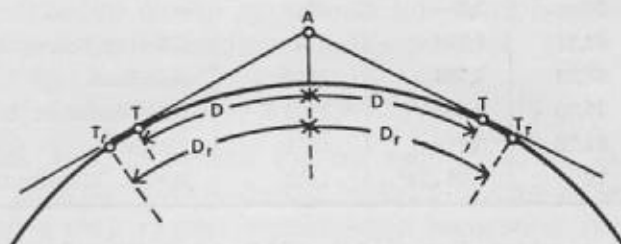
Rovnice (30) vyjadřuje vztah zakřivení paprsku a zemského povrchu za normálních podmínek. Tento případ bývá označován za standardní refrakci. Jestliže bychom uvažovali poloměr zakřivení Země $\frac{4}{3}R$, pak by paprsky probíhaly přímočaře. Hodnotu $K = \frac{4}{3}$ nelze chápat jako všeobecně platnou. Na př. v Itálii podle výzkumných měření je hodnota $K = 1,1$ až $1,2$ (viz [4]).

U světelných paprsků je hodnota $K \doteq \frac{8}{7}$.

Index lomu se zmenšuje lineárně s rostoucí výškou. Dráha radiového paprsku se tak blíží oblouku kružnice. Zakřivením radiového paprsku se zvětšuje dosah za geometrický obzor. Za předpokladu, že $K = \frac{4}{3}$, je posunut radiový obzor asi o 15 % vzdálenosti geometrického obzoru.

Na obr. 12 je schematicky nakreslen rozdíl vzdáleností geometrického obzoru D a vzdálenosti radiového obzoru D_r .

Zakřivení dráhy paprsku elektromagnetických vln se v praxi vyjadřuje t. zv. refrakčním součinitelem $k = \frac{R}{r}$, kde R je poloměr Země a r je poloměr oblouku kružnice, kterým nahrazujeme dráhu paprsku. Pro světelné paprsky se používá refrakčního součinitele $k = 0,13$, který stanovil Gauss; pro ultrakrátké vlny je $k = 0,25$ (pro $\frac{dn}{dh} = -0,04 \cdot 10^{-6}$).



Obr. 12.

7. Meteorologické podmínky

Vzorce pro výpočet indexu lomu jsou odvozeny pro normální atmosférické podmínky, kdy index lomu závisí pouze na nadmořské výšce. Protože index lomu závisí na teplotě, tlaku vzduchu a tlaku vodních par obsažených ve vzduchu, je předpokládaná pravidelnost změny indexu lomu ve značné míře omezena proměnlivými meteorologickými podmínkami, jež můžeme zjistit podél dráhy měřené délky jen s určitou přesností. Výzkumu šíření elektromagnetických vln ve vzduchu bylo věnováno již mnoho úsilí po celou řadu let a byla odvozena řada empirických rovnic pro výpočet indexu lomu v závislosti na meteorologických faktorech.

Vzorec pro výpočet indexu lomu radiových vln má tvar (viz [17])

$$N' = K_1 \frac{p_d}{T} + K_2 \frac{e}{T} + K_3 \frac{e}{T^2}, \quad (31)$$

kde $N' = (N - 1) \cdot 10^6$, p_d je tlak suchého vzduchu v milibarech, e tlak vodních par v milibarech, T absolutní teplota a K_1, K_2, K_3 jsou konstanty. Následující tabulka podává chronologický přehled hodnot konstant pro ultrakrátké vlny, uveřejněných do roku 1952.

Tabulka konstant K_1 , K_2 , K_3 pro výpočet indexu lomu N

| K_1 | K_2 | K_3 | Rok | Autor |
|-------|-------|-------------------|------|----------------------------|
| 79,1 | 68,3 | $3,81 \cdot 10^5$ | 1935 | Englund, Crawford, Mumford |
| 79 | 68,5 | 3,72 | 1940 | Waynick |
| 79 | 68 | 3,77 | 1943 | Smith-Rose, Stickland |
| 79 | 68 | 3,8 | 1946 | — |
| 76,43 | 67,51 | 3,767 | — | US Air-Forces |
| 77,54 | 67,88 | 4,785 | 1950 | Aslakson |
| 79,00 | 79,00 | 3,790 | 1951 | Nat. Bureaux of Standards |
| 77,62 | 64,70 | 3,719 | 1951 | Essen |
| 77,6 | 72 | $3,75 \cdot 10^5$ | 1952 | Smith, Weintraub |

Konstanty uvedené v posledním řádku tabulky udávají rovnici

$$N' = 77,6 \frac{p_d}{T} + 72 \frac{e}{T} + 3,75 \cdot 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (32)$$

Přejdeme-li k celkovému tlaku vzduchu $p = p_d + e$, dostáváme

$$N' = 77,6 \frac{p}{T} - 6 \frac{e}{T} + 3,75 \cdot 10^5 \frac{e}{T^2}, \quad (33)$$

Rovnici je možno ještě dále upravit na tvar

$$N' = \frac{77,6}{T} \left(p + 4,81 \cdot 10^3 \frac{e}{T} \right). \quad (34)$$

Vzorce se používá v rozmezí teplot od -50° do $+40^\circ$ C, tlaku vzduchu 200 až 1100 milibarů a tlaku vodních par 0 až 30 milibarů. Vzorce (34) je možno použít i k výpočtu indexu lomu ostatních druhů radiových vln. Přesnost výpočtu klesá až na 0,5 %.

Někdy bývá uváděn pro výpočet indexu lomu vzorec (viz [4]):

$$M = \left(N - 1 + \frac{h}{R} \right) \cdot 10^6 = \frac{79}{T} \left(p - \frac{11}{79} e + 4800 \frac{e}{T} \right) + 0,157h, \quad (35)$$

kde h je nadmořská výška.

Na zemském povrchu se normální hodnota indexu lomu pro ultra-krátké vlny pohybuje kolem 1,000 32.

Závislost indexu lomu světelných vln na meteorologických podmínkách je podle Kohlrausche dána rovnicí

$$N = 1 + \frac{1}{N_0(1 + \alpha t)} \frac{p}{760} - \frac{55 \cdot 10^{-9}}{1 + \alpha t} e, \quad (36)$$

kde N_0 je index lomu při teplotě $t = 0^\circ \text{C}$ a tlaku vzduchu 760 mm, t je teplota ve stupních Celsia, p tlak vzduchu v milibarech a $\alpha = \frac{1}{273}$.

Refrakce elektromagnetických paprsků zakřivuje jejich dráhu, takže měřené hodnoty délek jsou delší než přímé spojnice koncových bodů délky. Pro vzdálenosti dlouhé jen několik kilometrů není však třeba přihlížet k opravě délky ze zakřivení dráhy paprsků.

8. Atmosferický vlnovod

Následkem velkých rozdílů teploty nebo relativní vlhkosti se vytvoří vrstvy vzduchu spolu sousedící, jejichž teplota nebo vlhkost jsou velmi rozdílné a mají různou dielektrickou konstantu. Paprsek, jenž je téměř rovnoběžný s povrchem Země a vrstvami vzduchu, se několikrát odráží mezi povrchem Země a rozdílnou vrstvou vzduchu nebo mezi dvěma rozdílnými vrstvami vzduchu, takže se šíří vlastně v jakémsi vlnovodu. Vlnovod lze pozorovat jen ve zvláštních případech u radiových vln. Výška takového vlnovodu bývá 3 až 10 m. Předpokládá se, že největší vlnová délka, která se ještě může šířit vlnovodem, dosahuje přibližně dvojnásobku výšky vlnovodu. Velké rozdíly atmosférických podmínek sousedních vzduchových vrstev mohou být trvalejšího rázu jen při povrchu Země. Nejčastěji se s takovými zjevy setkáváme v tropech za klidného počasí a na oceánech. Různá pozorování dokázala, že nad převážnou částí teplých moří existuje skoro stálý atmosférický vlnovod vysoký asi 3 m. Nejlépe se řídí vlnovodem ultrakrátké vlny. Jsou také mnohem méně tlumeny než při normálním šíření. Tak se stává, že dosah těchto vln se i několikanásobně zvětší. Na př. v roce 1944 bylo zachyceno v Anglii na obrazovkách radaru francouzské pobřeží u Cherbourgu. Dosud nejmarkantnější případ takového vlnovodu bylo zaměření pobřežní linie Arabie a Západní Indie. Vzdálenost obou míst je asi 2000 km.

9. Rychlost šíření elektromagnetických vln

Pro rychlost šíření elektromagnetických vln v prostředí s indexem lomu N platí podle rovnice (15)

$$v = \frac{c}{N} \quad (37a)$$

nebo

$$v = \frac{c}{\sqrt{\mu \cdot \epsilon}}, \quad (37b)$$

kde c je rychlost elektromagnetických vln ve vakuu, μ permeabilita a ε dielektrická konstanta prostředí.

Elektromagnetické vlnění se šíří ve vakuu bez ohledu na délku vln, stejnou rychlostí c . Protože je tato rychlost velká, je obtížné ji měřit. Během mnoha let byla určena již řada hodnot různými měřickými metodami. Porovnáním výsledků sestavených v tabulce, získáváme přehled o přesnosti, která je závislá především na použité metodě měření.

Pro měření vzdáleností je třeba znát rychlost c s největší přesností. Poslední měření uvedená v tabulce vykazují značně vysokou přesnost. Rychlost elektromagnetických vln, šířících se určitým prostředím, je ovšem nižší než ve vakuu. Při měření délek se šíří vlny vzduchem převážně blízko povrchu Země, kde se značně mění teplota, tlak a vlhkost. V tomto nestejnorožném prostředí je rychlost elektromagnetických vln v určitých mezích proměnlivá. Přesnost určení rychlosti závisí na znalosti meteorologických podmínek podél dráhy šíření paprsků.

Pro měření délek radiovými vlnami se zprvu používalo v Anglii hodnoty Michelsonovy, určené v roce 1935 ($c = 299\,774$ km/sec) a v Americe hodnoty Andersonovy z roku 1941 ($c = 299\,776$ km/sec). Obě hodnoty se používaly během druhé světové války. Teprve po válce se ukázalo, že správná hodnota je o něco větší. Dnes je považována za nejspřávnější hodnotu rychlosti elektromagnetických vln ve vakuu hodnota $c = 299\,793$ km/sec $\pm 0,3$ km/sec. Měření ukázala, že světlo a ostatní elektromagnetické vlny mají ve vakuu stejnou rychlost.

Je zajímavé, že pro radiové soustavy Shoran a Hiran lépe vyhovuje rychlost šíření elektromagnetických vln stanovená Andersonem. Tato nesrovnalost se vysvětluje tím, že dochází u těchto přístrojů ke kompenzaci systematických chyb rychlosti světla a chyb přístroje.

V následující tabulce jsou vypočteny střední rychlosti vln mezi Zemí a letadlem, odvozených ze vzorce Englundova, Crawfordova a Mumfordova pro různé výšky letadla

$$v = \frac{c}{1 + \left(79,1 \frac{Pd}{T} + 68,3 \frac{e}{T} + 3,81 \cdot 10^5 \frac{e}{T^2} \right) \cdot 10^{-6}} \quad (38)$$

Střední rychlost byla vypočtena pro normální meteorologické podmínky. Ve třetí části tabulky je uvedeno pokusné měření pomocí ultrakrátkých vln, konaných Jonesem. Měření byla konána radarovým přístrojem „Oboe“. Výsledky se dobře shodují s teoretickými výpočty (viz [9]).

Měření rychlosti elektromagnetických vln

| Autor měření | Rok měření | Rychlost v km |
|--|------------|------------------|
| Fizeau | 1849 | 315 300 |
| Foucault | 1862 | 298 000 ± 500 |
| Cornu | 1874 | 299 990 ± 200 |
| Michelson | 1879 | 299,910 ± 50 |
| Newcomb | 1882 | 299 860 ± 30 |
| Perrotin | 1902 | 299 901 ± 84 |
| Rosa, Dorsay | 1906 | 299 781 ± 10 |
| Michelson | 1924 | 299 802 ± 30 |
| Michelson | 1926 | 299 796 ± 4 |
| Mittelstädt | 1929 | 299 778 ± 20 |
| Michelson, Pease, Pearson | 1932-33 | 299 774 ± 11 |
| Anderson | 1937 | 299 771 ± 14 |
| Hüttel | 1940 | 299 768 ± 10 |
| Anderson | 1941 | 299 776 ± 14 |
| Birge | 1941 | 299 776 ± 4 |
| Jones a Cornford | 1943 | 299 788 ± 20 |
| Aslakson | 1947 | 299 792,4 ± 1,4 |
| Essen | 1947 | 299 793 ± 9 |
| Bergstrand | 1948 | 299 792,4 ± 2 |
| Aslakson | 1949 | 299 792 ± 1 |
| Bergstrand | 1949 | 299 792,7 ± 0,3 |
| Camplair | 1949 | 299 792,3 ± ? |
| Bergstrand | 1950 | 299 793,1 ± 0,25 |
| Essen | 1950 | 299 792,5 ± 1,0 |
| Bol | 1950 | 299 789,3 ± 0,4 |
| Aslakson | 1951 | 299 792,4 ± 1,4 |
| Fromme | 1952 | 299 792,6 ± 0,7 |
| Fromme | 1952 | 299 793,0 ± 0,3 |
| Ze základny Ridgeway a Caithnes (Mackenzie) | 1953 | 299 792,3 ± 0,5 |
| Veličko-Vasiljev | 1954 | 299 793,9 ± 1 |

| Výška letadla ve stopách | Střední rychlost v km/sec | Systém „Oboe“ v km/sec |
|-----------------------------|------------------------------|---------------------------|
| 0 | 299 680 | |
| 10 000 (\pm 3280 m) | 299 710 | 299 713 |
| 20 000 (\pm 6560 m) | 299 725 | 299 733 |
| 30 000 (\pm 9840 m) | 299 740 | 299 750 |

Rychlost šíření vln V je podle vzorce (37) závislá na třech veličinách: c , μ a ε . Relativní chyba v určení rychlosti je dána vztahem

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{\Delta c}{c} - \frac{\Delta \mu}{2\mu} - \frac{\Delta \varepsilon}{2\varepsilon} \quad (39)$$

Chyba Δc rychlosti šíření elektromagnetických vln ve vakuu je malá, řádově asi 10^{-6} . Působí systematicky a je ji možno vyloučit.

Permeabilita μ a dielektrická konstanta ε se mění v závislosti na prostředí. Ve vakuu jsou obě veličiny rovny jedné.

Rinner uvádí několik hodnot μ a ε určených laboratorně pro šíření světelných vln v různých prostředích (viz [16]):

| Prostředí | μ | ε |
|--------------|---------------|---------------|
| Vakuum | 1,000 000 000 | 1,000 000 |
| Vzduch vlhký | 1,000 000 366 | 1,000 875 |
| Vzduch suchý | 1,000 000 366 | 1,000 594 |
| Kyslík | 1,000 000 175 | 1,000 550 |
| Vodík | 0,999 999 997 | 1,000 220 |
| Dusík | 0,999 999 996 | 1,000 610 |
| Voda | 0,999 988 2 | 81 |

Z tabulky je zřejmé, že změny permeability μ jsou pro vzduch mnohonásobně menší než změny dielektrické konstanty ε . Protože permeabilita μ nedosahuje řádově ani hodnoty $1 \cdot 10^{-6}$, můžeme ji z dalších úvah o přesnosti vyloučit. Chyba takto vzniklá působí na měření délky systematicky.

Největší vliv na změnu rychlosti má tedy dielektrická konstanta ε , jež je závislá především na vlhkosti vzduchu.

Obecně platí pro prostředí plynu vztah

$$\varepsilon = 1 + k \frac{p}{T}, \quad (40)$$

kde p je tlak vzduchu, T absolutní teplota a k je konstanta závislá na množství vodních par. Pro suchý vzduch $k_s = 211 \cdot 10^{-6}$ a pro vodní páry $k_v = 182 \cdot 10^{-6} \left(1 + \frac{5582}{T}\right)$. Na př. pro $t = 0^\circ \text{C}$ [$T \doteq 273$] je $k_v = 18 \cdot k_s$ (viz [16]).

Uvažujeme-li také tlak vodních par e obsažených ve vzduchu, bude dielektrická konstanta ε dána vztahem

$$\varepsilon = 1 + \alpha \frac{p}{T} + \beta \frac{e}{T} + \gamma \frac{e}{T^2}. \quad (41)$$

Tlak vodních par můžeme vypočítat z psychrometrického měření

$$e = e' - 0,000652p(t - t')(1 - 0,00102 \cdot t'), \quad (42)$$

kde e' je tlak nasycených vodních par, p tlak vzduchu, t teplota suchého termometru a t' odpovídající teplota vlhkého termometru.

Za ideálních podmínek může být dielektrická konstanta ε vypočtena jako funkce nadmořské výšky h , protože všechny hodnoty (teplota t , tlak vzduchu p a tlak vodních par e) jsou závislé na nadmořské výšce a s jejím stoupáním klesají. Eckardt a Pendl uvádějí pro výpočet ε funkční vztah (viz [16])

$$(\varepsilon - 1) \cdot 10^6 = A + Bh_m + Ch_{km}^2, \quad (43)$$

kde h je nadmořská výška vyjádřená při koeficientu B v metrech a při koeficientu C v km. Experimentálně byly zjištěny pro konstanty A , B , C (viz [16]) tyto hodnoty:

| Vzduch | A | B | C |
|---------------|-------|---------|--------|
| Vlhký | + 867 | - 137,0 | + 6,00 |
| Středně vlhký | + 725 | - 96,0 | + 3,20 |
| Suchý | + 594 | - 56,9 | + 0,62 |

Z úvah o veličinách μ a ε pro výpočet indexu lomu N (nebo rychlosti v) vyplývá

$$N \doteq \sqrt{\varepsilon} \quad (44)$$

anebo
$$N - 1 \doteq \frac{1}{2} (\varepsilon - 1), \quad (45)$$

takže podle rovnice (41) bude

$$(N - 1) \cdot 10^8 = K'_1 \frac{p}{T} + K'_2 \frac{e}{T} + K'_3 \frac{e}{T^2}. \quad (46)$$

Dospěli jsme tak prakticky k rovnici (31) uvedené pro výpočet indexu lomu ve stati pojednávající o refrakci elektromagnetických vln. Z rovnic (37) a (46) vyplývá, že rychlost v je funkcí teploty vzduchu, tlaku vzduchu a tlaku vodních par:

$$v = c \cdot f(T, p, e). \quad (47)$$

Podobně podle rovnice (43) bude

$$v = c \cdot g(h), \quad (48)$$

kde rychlost v je vyjádřena v závislosti na nadmořské výšce h pro ideální atmosférické podmínky.

Pro malé hodnoty h od 0 do 10 km můžeme psát (viz [16])

$$v = \bar{a} + \bar{b}h_{\text{km}} + \bar{c}h_{\text{km}}^2. \quad (49)$$

Podle Eckardta a Pendla nabývají koeficienty \bar{a} , \bar{b} , \bar{c} těchto hodnot:

| Vzduch | \bar{a} | \bar{b} | \bar{c} |
|---------------|-----------|-----------|-----------|
| Vlhký | 299 660 | 20,7 | -0,90 |
| Středně vlhký | 681 | 14,4 | -0,48 |
| Suchý | 701 | 8,6 | -0,08 |

Z uvedeného rozboru rychlosti šíření elektromagnetických vln vyplývá, že relativní chyba $\frac{\Delta v}{v}$ je dána prakticky výrazem

$$\frac{\Delta v}{v} \doteq \frac{\Delta c}{c} - \frac{\Delta \varepsilon}{2\varepsilon}. \quad (50)$$

Protože

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{\Delta \mu}{2\mu} + \frac{\Delta \varepsilon}{2\varepsilon} \doteq \frac{\Delta \varepsilon}{2\varepsilon}, \quad (51)$$

můžeme psát, že

$$\frac{\Delta v}{v} \doteq \frac{\Delta c}{c} - \frac{\Delta N}{N}. \quad (52)$$

Podle rovnice (46) je index lomu dán funkcí

$$N = f(T, p, e). \quad (53)$$

Chybu indexu lomu ΔN je možno určit ze vztahu

$$\Delta N = \Delta N_T + \Delta N_p + \Delta N_e, \quad (54)$$

$$\text{kde } \Delta N_T = \frac{\partial f}{\partial T} \Delta T, \Delta N_p = \frac{\partial f}{\partial p} \Delta p, \Delta N_e = \frac{\partial f}{\partial e} \Delta e$$

Pro $N = 1,000\ 305$, což je index lomu pro zelenožluté světlo a pro $t = 0^\circ\text{C}$, $p = 760$ mm bude (viz [19])

$$\Delta N_T \doteq -1,12 \cdot 10^{-6} \quad \text{pro } \Delta T = 1^\circ\text{C},$$

$$\Delta N_p \doteq +0,40 \cdot 10^{-6} \quad \text{pro } \Delta p = 1 \text{ mm},$$

$$\Delta N_e \doteq -0,06 \cdot 10^{-6} \quad \text{pro } \Delta e = 1 \text{ mm}.$$

Uvedené chyby vyjadřují přesnost indexu lomu. Protože index lomu je prakticky roven jedné, vyjadřují vypočtené chyby vlastně také relativní chybu v určení rychlosti světla. Chybu ze změny vlhkosti vzduchu při měření délek nemusíme brát v úvahu, protože je vzhledem k ostatním chybám velmi malá.

Chyby indexu lomu radiových vln v závislosti na jednotlivých meteorologických podmínkách jsou dány hodnotami

$$\Delta N_T \doteq -1 \cdot 10^{-6} \quad \text{pro } \Delta T = 1^\circ\text{C},$$

$$\Delta N_p \doteq +0,3 \cdot 10^{-6} \quad \text{pro } \Delta p = 1 \text{ mm},$$

$$\Delta N_e \doteq -5 \cdot 10^{-7} \quad \text{pro } \Delta e = 1 \text{ mm}.$$

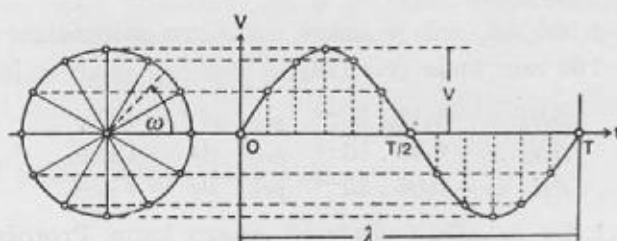
Z pozorování plyne: Změny teploty a tlaku vzduchu působí stejně na rychlost šíření světelných a radiových vln. Změna tlaku vodních par má však daleko vyšší vliv na radiové vlny než na světelné, zhruba 80krát. Proto je určení rychlosti radiových vln vzhledem k světelným vlnám méně přesné.

III. Modulace elektromagnetických vln

Elektromagnetické vlnění se schematicky znázorňuje křivkami, které vyjadřují stav elektrického a magnetického pole v závislosti na čase. Na jednu osu se vynáší čas t a na druhou příslušné výchylky v . Křivka tvaru sinusoidy charakterizuje normální průběh vlnění (viz obr. 13).

Dráhu vykonanou určitým bodem z bodu O do T nazýváme jedním kmitem nebo cyklem. Vzdálenost dvou po sobě jdoucích stejně velkých výchylek je délka vlny λ . Doba, za kterou se uskuteční jeden kmit, se

nazývá dobou kmitu nebo periodou T . Kmitočet nebo frekvence je počet kmitů za jednotku doby (vteřinu); je dán vztahem $f = \frac{1}{T}$, vyjadřuje se v cyklech c/s nebo hertzech Hz. U vyšších frekvencí se používá označení kilocykly kc/s nebo kilohertze kHz, případně megacykly Mc/s nebo megahertze MHz. Na příklad $1\,000\,000\text{ c/s} = 1\,000\text{ kc/s} = 1\text{ Mc/s}$. Někdy se vyjadřuje rychlost kmitání tak zvanou úhlovou rychlostí kmitání ω .



Obr. 13.

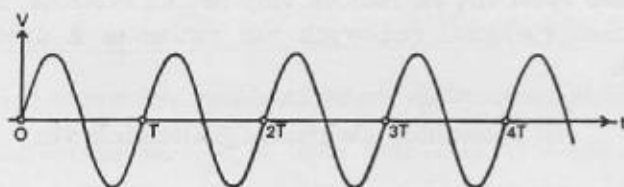
Pak platí $\omega = \frac{2\pi}{T}$ nebo $\omega = 2\pi \cdot f$. Rychlost elektromagnetických vln ve vakuu je $c = f \cdot \lambda$. Elektromagnetickou vlnu sinusového charakteru vyjádříme matematicky vzorcem

$$v_t = V \sin(2\pi ft + \varphi_0) \quad (55)$$

nebo

$$v_t = V \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (56)$$

kde je v_t výchylka v době t , V maximální amplituda a φ_0 fázový posun v okamžiku $t = 0$.



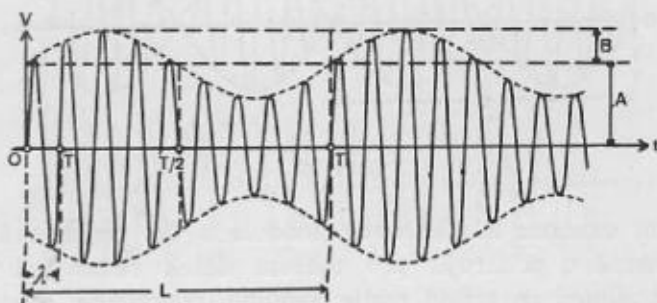
Obr. 14.

Rovnice (55) a (56) vyjadřují elektromagnetické vlnění, v němž jsou zachovány konstantní parametry V , f nebo (ω) , φ_0 (viz obr. 14).

K měření vzdáleností stejně jako k přenášení radiových signálů a informací nelze použít vlnění s neměnnými parametry, neboť nelze roz-

lišit vlnu vyslanou a vlnu odraženou. Zjistíme tím pouze vzájemnou existenci stanic. Možnost přenášení signálů od jednoho bodu k druhému závisí na možnosti měnit vhodným způsobem parametry. Operaci, kterou se mění hodnota jednoho nebo více parametrů, nazýváme modulací. Modulace je různého druhu:

1. modulace amplitudová,
2. modulace kmitočtová (frekvenční),
3. modulace fázová.



Obr. 15.

Každý parametr se může měnit podle určitého zákona. Základním typem takového zákona je sinusový průběh frekvence F , který se liší od původní frekvence f a je obvykle řádově mnohem menší. Frekvence f vyjadřující frekvenci původní elektromagnetické vlny, tak zvané nosné vlny, se nazývá nosnou frekvencí.

1. Amplitudová modulace

Amplitudovou modulací označujeme změnu amplitudy V podle určitého zákona. Mění-li se amplituda podle sinusu, bude platit pro amplitudu vztah (viz [4])

$$V = A + B \sin 2\pi Ft. \quad (57)$$

kde A je střední hodnota amplitudy V , B maximální změna amplitudy $V = A$ a F je modulační frekvence (viz obr 15).

Dosadíme-li tento výraz do původní rovnice (55) obdržíme rovnici

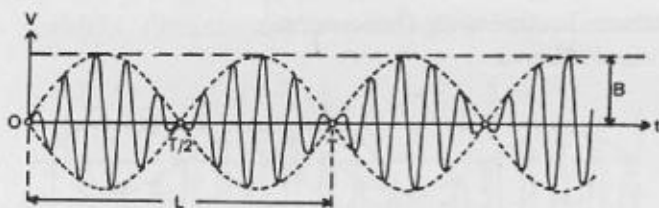
$$v_t = (A + B \sin 2\pi Ft) \sin (2\pi ft + \varphi_0) \quad (59)$$

a po úpravě

$$v_t = A(1 + m \sin 2\pi Ft) \sin (2\pi ft + \varphi_0) \quad (58)$$

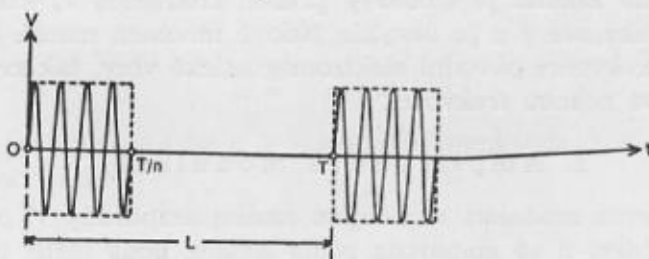
kde $m = \frac{B}{A}$. Koeficient m se nazývá hloubka modulace a nabývá různých

hodnot. U některých přístrojů pro měření délek světelnými vlnami se koeficient m blíží hodnotě 1. Na obr. 15 je znázorněna amplitudová modulace pro $m = 0,4$ a na obr. 16 pro $m = \infty$. L značí modulační vlnovou délku a τ dobu jednoho cyklu modulace ($F = \frac{1}{\tau}$).



Obr. 16.

Zvláštním druhem amplitudové modulace je impulsová modulace, používaná hlavně u přístrojů pro měření délek radiovými vlnami. Při impulsové modulaci se střídá podle zvolené frekvence modulace malý časový interval $\frac{\tau}{n}$, kdy amplituda V nosné vlny má konstantní hodnotu, s časovým intervalem $\tau - \frac{\tau}{n}$ kdy amplituda $V = 0$ (viz obr. 17.) Doba



Obr. 17.

vysílání impulsu je mnohonásobně kratší než přestávka mezi impulsy. Při pulsové modulaci se teoreticky vytváří pravoúhlý tvar obalových křivek.

Vzdálenost D se vypočte z měřeného časového intervalu, během něhož proběhne impuls měřenou délkou tam a zpět, ze vzorce (1): $D = \frac{ct}{2}$.

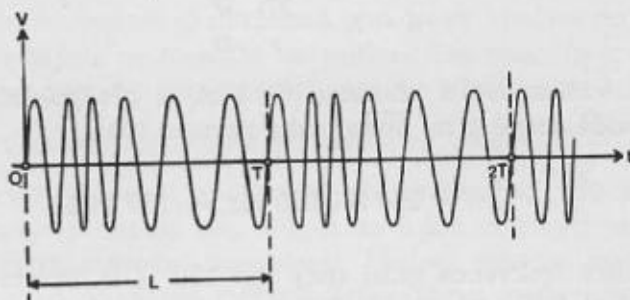
Aby mohla být délka měřena s přesností 1 m, je nutno měřit časový interval s přesností 1/150 000 000 vteřiny.

2. Frekvenční modulace

Při frekvenční modulaci je proměnnou veličinou nosná frekvence f . Frekvence nosné vlny je funkcí času; mění-li se na př. podle kosinového zákona, bude dána frekvence v čase t vztahem (viz [4])

$$f_i = f + \Delta f \cos 2\pi Ft, \quad (60)$$

kde Δf je maximální odchylka frekvence od střední hodnoty f a F značí opět frekvenci modulace.



Obr. 18.

Fáze za dobu t je dána integrálem

$$2\pi \int_0^t f_i dt = 2\pi ft + \frac{\Delta f}{F} \sin 2\pi Ft. \quad (61)$$

Dosadíme-li do rovnice (55), obdržíme rovnici pro frekvenční modulaci nosné vlny:

$$v_t = V \sin \left(2\pi ft \pm \frac{\Delta f}{F} \sin 2\pi Ft + \varphi_0 \right). \quad (62)$$

Schematicky je znázorněna frekvenční modulace na obr. 18.

Této modulaci se používá výhradně u radiových přístrojů pro měření délek. Dosud se nepodařilo frekvenčně modulovat světelné vlny. Často se používá lineární modulace frekvence, vyjádřené vztahem

$$f = f_0 + \frac{\Delta f}{\Delta t} t. \quad (63)$$

V rovnici značí $\frac{\Delta f}{\Delta t}$ změnu frekvence za jednotku času.

Vzdálenost měřená elektromagnetickými vlnami s modulovanou frekvencí se vypočte z rozdílu frekvence vysílané a odražené vlny. Vlna

vyslaná v okamžiku $t = 0$ z prvního koncového bodu A měřené vzdálenosti se odrazí na druhém koncovém bodě B a vrátí se do bodu A za dobu $t = \frac{2D}{c}$ (viz obr. 1). Jestliže elektromagnetická vlna vysílaná z bodu A v čase $t = 0$ má frekvenci f_0 , pak v čase $t = \frac{2D}{c}$ bude mít frekvenci $f_t = f_0 + \frac{2D \cdot \Delta f}{c \cdot \Delta t}$.

Rozdíl mezi frekvencemi je úměrný vzdálenosti D :

$$f_t - f_0 = \frac{2D}{c} \frac{\Delta f}{\Delta t} \quad (64)$$

K určení vzdálenosti s přesností ± 1 m za předpokladu, že změna 1 cyklu odpovídá právě 1 m, bude podle rovnice (64)

$$\frac{\Delta f}{\Delta t} = \frac{c}{2} = 150\,000\,000 \text{ Hz} = 150 \text{ MHz.}$$

Základní vysílací frekvence musí tedy být 150 MHz. Při této frekvenci je pro určení vzdálenosti na př. 100 km třeba celkového rozdílu frekvencí 100 kHz.

Pomocí modulace frekvence je možno měřit také rychlost pohybujících se předmětů, na př. letadel, lodí atd. na základě Dopplerova principu. Pro geodesii však zjišťování rychlosti nemá praktického významu.

3. Fázová modulace

U fázové modulace elektromagnetických vln je proměnnou veličinou φ_0 . Probíhají-li změny podle sinusového vztahu vyjádřeného rovnicí

$$\varphi = \varphi_0 \sin 2\pi Ft, \quad (65)$$

je fázová modulace dána výrazem

$$v_t = V \sin(2\pi Ft + \varphi_0 \sin 2\pi Ft). \quad (66)$$

Porovnáme-li rovnici (66) s rovnicí pro frekvenční modulaci (62), dospějeme k závěru, že fázová modulace se v podstatě rovná frekvenční modulaci, kde $\frac{\Delta f}{F} = \varphi_0$. Proto se v odborné literatuře setkáváme jen se dvěma druhy modulací elektromagnetických vln, a to s modulací amplitudovou a frekvenční.

IV. Způsoby měření délek elektromagnetickými vlnami

Podle toho, které fyzikální veličiny měříme, můžeme pomocí elektromagnetických vln určit vzdálenost

1. z měřeného časového intervalu,
2. z měřeného fázového rozdílu,
3. z měřené změny frekvence.

1. Určení délky měřením časového intervalu

Jak již bylo uvedeno u modulace impulsové, spočívá nejčastější způsob určení velkých vzdáleností na měření časového intervalu t , který uplyne, než se vyslaný impuls vrátí zpět po odražení na koncovém bodě měřené vzdálenosti. Vzdálenost se počítá ze vztahu $D = \frac{vt}{2}$. Protože časový interval je velmi malý (na př. vzdálenost 300 km proběhne elektromagnetický impuls tam a zpět za 0,002 vteřiny), není možno jej měřit obvyklými známými metodami. Časový interval se měří pomocí katodové trubice. Přesnost měřené délky závisí vedle přesnosti měření časového intervalu také na přesné znalosti rychlosti šíření elektromagnetických vln.

2. Určení délky měřením fázového rozdílu vln

Při měření fázového rozdílu vyslané a odražené vlny je výchylka v_1 elektromagnetické vlny v čase $t = t_0$ v počátečním bodě vzdálenosti dána vztahem

$$v_1 = V \sin(2\pi ft_0 + \varphi_0). \quad (67)$$

V okamžiku, kdy se vrátí odražená vlna zpět do počátečního bodu, má vysílaná vlna výchylku

$$v_2 = V \sin\left(2\pi ft + 2\pi \frac{2D}{\lambda} + \varphi_0\right). \quad (68)$$

Fázový rozdíl vysílané a odražené vlny v počátečním bodě je tedy roven

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{2D}{\lambda}. \quad (69)$$

Je zřejmé, že není možno měřit fázový rozdíl větší než 2π , protože jinak je více řešení. Za tohoto předpokladu by bylo možno určit touto metodou vzdálenosti, pro něž platí

$$\frac{2D}{\lambda} < 1, \text{ nebo } D < \frac{\lambda}{2}. \quad (70)$$

Měřená vzdálenost je dána vztahem

$$D = \frac{r}{2}, \quad (71)$$

kde r je délka odpovídající fázovému rozdílu $2\pi \frac{2D}{\lambda}$.

Kdyby se modulační frekvence volila podle zásady, že vzdálenost nemá být větší než polovina vlnové délky, musela by být na př. pro měřenou vzdálenost 300 km vlnová délka modulace nejméně $L = 600$ km, takže frekvence modulace $F \leq 500$ Hz. Pro malou vzdálenost, na př. 300 m, stačí vlnová délka modulace jen $L = 600$ m, t. j. $F \leq 500$ kHz. Velké změny frekvence není možné na přístroji provádět, protože by tím značně klesla přesnost stability frekvencí, a tím i přesnost měřených délek. Na druhé straně nelze používat k měření tak nízkých modulačních frekvencí, protože fázový rozdíl měřený ve stupních se určuje s maximální přesností 1° . Délce vlny odpovídá $2\pi = 360^\circ$, takže relativní chyba fázového rozdílu je v nejvýhodnějších případech (asi $\frac{1}{360}$) naprosto nedostačující. Proto se používá u všech přístrojů pro měření délek pomocí rozdílu fází vysílané a odražené elektromagnetické vlny amplitudové modulace s modulační frekvencí F , jejíž hodnota vyhovuje žádané přesnosti měření. Na př. u přístrojů pro měření délek modulovanými světelnými vlnami je frekvence amplitudové modulace 8 až 10 MHz. Je samozřejmé, že měřená vzdálenost bude mnohonásobně větší než vlnová délka modulace L . Vzdálenost je pak dána obecně rovnicí

$$D = \frac{n \cdot L + r}{2}, \quad (72)$$

kde výraz $n \cdot L$ je počet celých vlnových délek modulace na délce $2D$ a r je opět délka odpovídající fázovému rozdílu modulovaných vln $\Delta\varphi$.

U přístrojů pro měření délek pomocí světla se používá k určení vzdálenosti až na malé výjimky jen fázového rozdílu modulovaných vln. Modulace světelných vln je vždy amplitudová.

Přístroje pro měření délek radiovými vlnami nemohou pracovat s vlnou jedné frekvence f , protože vysílaná vlna je stejná jako odražená. Z toho důvodu se vysílá obvykle z radiových přístrojů na počátečním bodě měřené délky nosná vlna s frekvencí f_1 , která se moduluje nižší frekvencí F . Na koncovém bodě přijímač zachytí vyslanou vlnu a pomocí zachycené frekvence F moduluje a posílá zpět jinou nosnou vlnu s frekvencí f_2 . Obě

modulované vlny, vysílaná a odražená, jsou spolu srovnávány v přístroji na počátečním bodě a měří se jejich fázový rozdíl.

Měření vzdáleností pomocí fázového rozdílu vysílané a odražené elektromagnetické vlny se prakticky dělí na dva způsoby:

- a) přímé měření fázového rozdílu,
- b) nepřímé měření fázového rozdílu.

a) přímé měření fázového rozdílu

Fázový posun r se měří různými fázovými posunovači. Jsou to zařízení, která umožňují umělé posunutí fáze tak, aby v přístroji bylo dosaženo určitého konstantního fázového rozdílu mezi vlnou vysílanou a odraženou. Tato zařízení mají cejchované stupnice, na nichž se přímo odečítají fázové posuny.

Závislost mezi tímto fázovým úhlem a hledanou vzdáleností vyplývá ze známé modulační frekvence a rychlosti šíření elektromagnetické vlny. Protože modulační vlnová délka je mnohokrát menší než měřená vzdálenost, není možno vypočítat celou vzdálenost, ale jen délku úměrnou fázovému rozdílu. Je dána vztahem

$$r = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} L. \quad (73)$$

Měřenou vzdálenost je proto nutno znát přibližně s větší přesností než $\pm \frac{L}{2}$. Aby se nemusela určovat přibližná vzdálenost jinými způsoby, používá se k měření vzdáleností ještě jiných modulačních frekvencí, takže délka musí být známa jen s velmi malou přesností. Na podobném principu je založen známý přístroj pro měření délek pomocí světla — Bergstrandův geodimetr.

b) Nepřímé měření fázového rozdílu

U předešlého způsobu byl fázový posun určen umělou změnou fáze odražené vlny. Změna fáze se však také docílí malou změnou vysílací modulační frekvence a tím i vlnové délky modulace. Modulační frekvenci měníme na př. tak dlouho, až v dvojnásobné měřené vzdálenosti je obsažen beze zbytku celý násobek modulačních vlnových délek L_1 . Pro vzdálenost pak platí rovnice

$$D = n \frac{L_1}{2}. \quad (74)$$

V rovnici jsou dvě neznámé: měřená délka D a počet vlnových

délek n . Proto se mění dále frekvence, na př. zvyšuje, až přístroj ukáže nejbližší dálkový nulový fázový rozdíl. Nyní je v dvojnásobné měřené délce obsaženo $n + 1$ modulačních vlnových délek L_2 , takže vzdálenost je dána vztahem

$$D = (n + 1) \frac{L_2}{2}. \quad (75)$$

Z těchto rovnic je možno vypočítat po vyloučení neznámé n vzdálenost D :

$$D = \frac{1}{2} \frac{L_1 \cdot L_2}{L_1 - L_2}. \quad (76)$$

Tímto způsobem se měří vzdálenosti několika přístroji pro měření délek světelnými vlnami, na př. SVV I, EMc, Ellenbergerovým přístrojem atd. Zjišťují se zpravidla ještě další nulové fázové rozdíly, takže pro vzdálenost dostáváme několik hodnot. Výsledná vzdálenost je dána jejich aritmetickým průměrem.

3. Určení délky měřením změny frekvence

Princip určení vzdáleností měřením změny frekvence byl již dříve vysvětlen pro lineárně probíhající frekvenční modulaci elektromagnetických vln. Vzdálenost se vypočte z rozdílu frekvencí vysílané a odražené elektromagnetické vlny $f_1 - f_0$ z rovnice (64)

$$D = c \frac{f_1 - f_0}{2 \frac{\Delta f}{\Delta t}}, \quad (77)$$

kde $\frac{\Delta f}{\Delta t}$ je změna frekvence za jednu vteřinu.

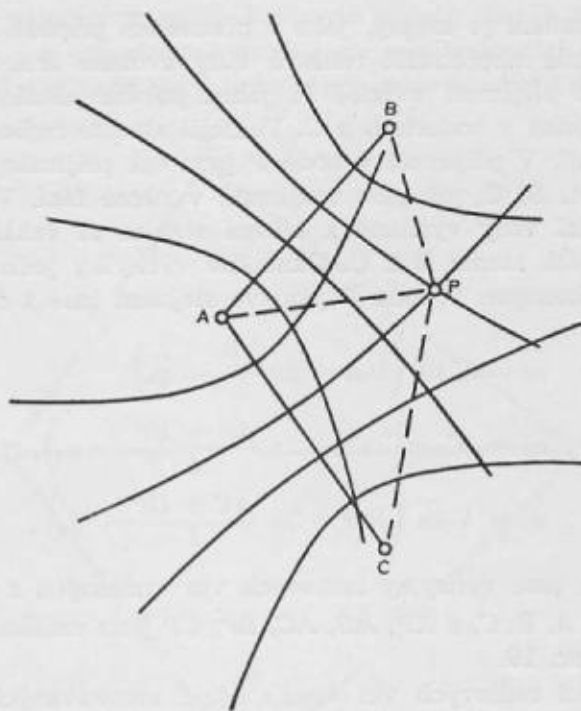
Tohoto způsobu určení vzdáleností používají jen radiové přístroje.

V. Měření rozdílů vzdáleností

Radiolokační technika dnes pracuje s mnoha přístroji, kterými se určuje poloha letadel nebo lodí a pod., pomocí rozdílů vzdáleností od dvou nebo tří dvojic pozemních radiových stanic. Stejný rozdíl vzdáleností od dvou pevných bodů určuje geometrické místo bodů; v rovině je to křivka, hyperbola, v prostoru pak plocha hyperboloidu. Určení polohy je zřejmé z obr. 19. Jednu dvojici pevných bodů (ohnisek) tvoří stanice A, B a druhou dvojici stanice B, C . Zjištěním rozdílů vzdáleností $\overline{AP} - \overline{BP}$ a $\overline{AP} - \overline{CP}$ je určen bod P , který je průsečíkem dvou hyperbol.

Rozdíl vzdáleností se měří podobnými metodami jako přímo měřené délky:

1. měřením časového intervalu,
2. měřením rozdílu fází.



Obr. 19.

1. Určení rozdílů délek měřením časového intervalu

Z bodu A (viz obr. 19) jsou vysílány krátké impulsy. Přijímač v bodě P zachytí nejprve tyto impulsy v čase t_A . Impulsy z bodu A jsou také zachyceny vysílači v místech B, C, kde se zesílí a jsou vysílány opět do prostoru. V přijímači P jsou impulsy z bodů B a C zachyceny v čase t_B a t_C . Rozdíly vzdáleností ΔD_{AB} a ΔD_{AC} jsou pak dány rovnicemi

$$\begin{aligned} \Delta D_{AB} &= c(t_A - t_B) + K_1, \\ \Delta D_{AC} &= c(t_A - t_C) + K_2, \end{aligned} \quad (78)$$

kde $K_1 = \overline{AB}$ a $K_2 = \overline{AC}$ jsou známé vzdálenosti stanic.

Aby mohly být jednotlivé impulsy v indikátoru přijímače rozlišeny, jsou vysílány signály z vedlejších stanic B a C na jiných nosných frekvencích.

2. Určení rozdílu délek měřením rozdílu fází

Způsob vysílání je stejný, jako v předešlém případě. Hlavní stanice v bodě A vysílá nepřetržitě radiové vlny zvolené frekvence. Radiové vlny se šíří k přijímači v bodě P , jehož polohu hledáme, a k oběma vedlejšími stanicím v bodech B a C . Vedlejší stanice radiovou vlnu zesílí a znovu vysílají. V přijímači v bodě P jsou tak přijímány radiové vlny ze tří stanic A , B , C , jež jsou vzájemně v různé fázi. V indikátoru se měří rozdíl fází vlny vysílané z hlavní stanice A vzhledem k vlnám z obou vedlejších stanic B a C . Okamžité výchylky jednotlivých radiových vln, přijímaných v bodě P jsou ve stejném čase t dány rovnicemi

$$\begin{aligned} v_A &= V \sin \left(2\pi ft + 2\pi \frac{AP}{\lambda} + \varphi_0 \right), \\ v_B &= V \sin \left(2\pi ft + 2\pi \frac{AB + BP}{\lambda} + \varphi_0 \right), \\ v_C &= V \sin \left(2\pi ft + 2\pi \frac{AC + CP}{\lambda} + \varphi_0 \right), \end{aligned} \quad (79)$$

kde v_A , v_B , v_C jsou výchylky radiových vln vysílaných z pozemních radiových stanic A , B , C , a \overline{AP} , \overline{AB} , \overline{AC} , \overline{BP} , \overline{CP} jsou vzdálenosti radiových stanic podle obr. 19.

Rozdíly fází radiových vln $\Delta\varphi_{AB}$ a $\Delta\varphi_{AC}$, srovnávaných v indikátoru na bodě P , jsou

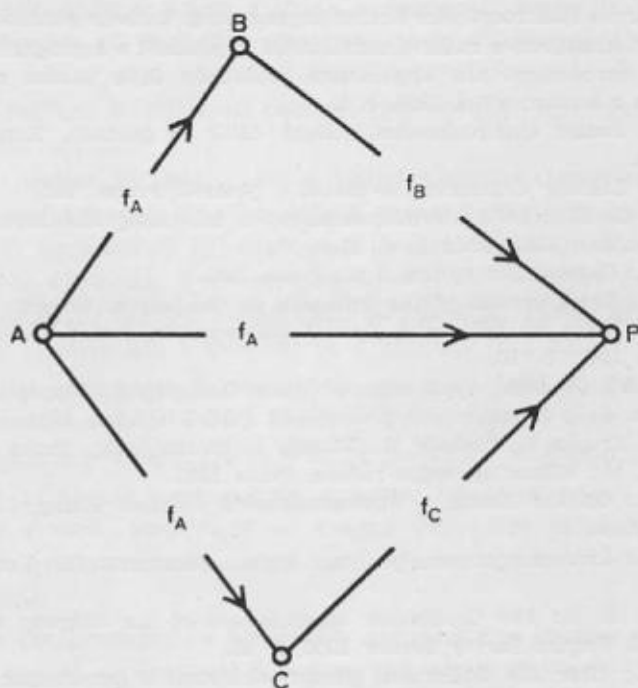
$$\begin{aligned} \Delta\varphi_{AB} &= 2\pi \left(\frac{\overline{AP} - \overline{AB} - \overline{BP}}{\lambda} \right), \\ \Delta\varphi_{AC} &= 2\pi \left(\frac{\overline{AP} - \overline{AC} - \overline{PC}}{\lambda} \right). \end{aligned} \quad (80)$$

Rozdíly vzdáleností jsou obecně dány rovnicemi

$$\begin{aligned} \Delta D_{AB} &= \frac{\Delta\varphi_{AB}}{2\pi} \lambda + K_1, \\ \Delta D_{AC} &= \frac{\Delta\varphi_{AC}}{2\pi} \lambda + K_2, \end{aligned} \quad (81)$$

kde ΔD_{AB} , ΔD_{AC} jsou rozdíly příslušných vzdáleností, $K_1 = \overline{AB}$ a $K_2 = \overline{AC}$ jsou dané vzdálenosti vysílaných stanic.

Prakticky vysílají stanice B a C radiové vlny jiných frekvencí než řídicí stanice A , aby mohly být vzájemně rozlišeny v přijímači v bodě P . Tak např. u systému Decca vysílá řídicí vysílač z bodu A radiové vlny s frekvencí f_A . Přijímače pomocných stanic B a C jsou naladěny na tuto vlnu. Vysílače pomocných stanic pak vysílají vlnu s frekvencí f_B a f_C (viz obr. 20). Přijímače v místě P upraví přijaté vlny s různým kmitočtem f_A , f_B , f_C na dvě dvojice vln se stejnou frekvencí, jejichž fázové rozdíly se měří a z nichž jsou určeny příslušné rozdíly vzdáleností.



Obr. 20.

VI. Na čem závisí přesnost měření délek elektromagnetickými vlnami

Ze vzorců (1), (72), (73), (76), a (77), podle nichž počítáme vzdálenosti, lze dokázat, že přesnost určených délek závisí na znalosti dráhy a rychlosti šíření elektromagnetických vln c , na stabilitě frekvence vysílané vlny, případně její modulační, a konečně na přesnosti měřené veličiny (časového intervalu, rozdílu fází, frekvence nebo rozdílu frekvencí). V některých vzorcích pro výpočet vzdáleností není na první pohled zřejmá závislost D na rychlosti šíření vln c , ale je zahrnuta ve vlnové délce

nosné vlny $\lambda = \frac{c}{f}$ nebo v modulační vlnové délce $L = \frac{a}{F}$, případně vzdálenosti r , která odpovídá fázovému rozdílu vln, tedy určité části vlnové délky λ nebo L .

Literatura:

- [1] Benz F.: Die Physikalischen Grundlagen der elektrischen Entfernungsmessung. Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen 1952, č. 3, 4.
- [2] Bjerhammar A.: Elektrooptische Entfernungsmessung. Bulletin géodésique 1956, č. 40.
- [3] Blahák V.: Akustické a radiové zaměřování v geodesii a kartografii, Praha 1955.
- [4] Carla M.: Introduzione alle applicazioni geodetiche della tecnica radar. Bolletino di geodesia e scienze affini 1954, č. 1.
- [5] Delong B.: Použití elektronického měření délek v geodesii. Kandidátská práce, Praha 1955.
- [6] Delong B.: Základy elektronických metod v geodesii, Praha 1955.
- [7] Gigas E.: Geodätische Entfernungsmessungen. Mitteilung des Instituts für angewandte Geodäsie 1954, řada B, č. 15.
- [8] Havelka B.: Geometrická optika, I. díl, Praha 1955.
- [9] Hart C. A.: Some Aspects of the Influence on Geodesy of Accurate Range Measurement by Radio Methods with Special Reference to Radar Techniques. Bulletin géodésique 1948, č. 10.
- [10] Hart C. A.: Geodetic Application of Radio Telegraphy. Rapport général No. 3 a l'occasion de la X^e assemblée générale de l'U.G.G.I., Rome 1954.
- [11] Horák Z., Krupka F., Šindelář V.: Základy technické fyziky, Praha 1955.
- [12] Larsen R. M.: Mikrovlny, srdce radaru, Praha 1951.
- [13] Laurila S.: On the Shoran - Photogrammetria Position Fixing, Photogrammetria 1954—55, č. 4.
- [14] Lichte H.: Entfernungsmessungen mit Radar, Zeitschrift für Vermessungswesen 1951, č. 9.
- [15] Mackenzie R. E.: The Geodimeter Measurement of the Ridgway and Caithness Bases, 1953. Empire Survey Review 1955, č. 95.
- [16] Rinner K.: Über die Reduktion grosser elektronisch gemessener Entfernungen. Zeitschrift für Vermessungswesen 1956, č. 2.
- [17] Smith E., Weintraub.: Koefficient prelomenija vozducha pri radiočastotach. Voprosy radiolokacionnoj techniki 1954, č. 2.
- [18] Šamšur V. I.: Radiolokace, Praha 1954.
- [19] Veličko V. A., Vasiljev V. P., Golosov V. V.: Izmerenije rasstojanij svetodalnomerom i opredelenije skorosti rasprostraneniya sveta. Geodezija i kartografija 1956, č. 1. (Český překlad: Vojenský topografický obzor 1956, č. 3-4.)

Radiolokační zabezpečení podkladu pro fotogrammetrické mapování

Jednou ze základních podmínek pro rozvoj geodesie je dnes využití elektronické techniky, jejíž bouřlivý růst umožnil její využití při konstrukci geodetických strojů.

V současné době v SSSR i jinde v zahraničí sestrojili přístroje pro měření vzdáleností na podkladě rychlosti šíření elektromagnetických a světelných vln.

Metody měření vzdáleností pomocí elektronické techniky se nazývají fyzikálními metodami.

K těmto měřením patří měření radiotechnická (radiolokace) a elektrooptická (světlolokace). První pokusné práce s použitím radiolokace pro přesné měření vzdáleností při budování geodetických sítí byly provedeny v SSSR v roce 1932–34. Výzkum prováděl N. N. Něčajev s fázovým rádiovým dálkoměrem MPŠ-1 konstrukce inž. Šelova. Tímto přístrojem bylo možno měřit vzdálenosti 200–5000 m s chybou ± 1 m.

Při použití dálkoměru vyšlo najevo, že jeho další použití v té formě, jak byl zkonstruován, je velmi obtížné. Proto byla v roce 1937–38 tato práce přerušena a pokračovalo se v ní až po Velké vlastenecké válce.

Rádiový dálkoměr zabezpečuje vysokou přesnost pouze při práci na krátkých vlnách. Poněvadž se krátké vlny šíří přímočaře, je třeba přímé viditelnosti mezi oběma anténami. V tom je hlavní nevýhoda krátkovlnných stanic.

Přístroji používanými v SSSR i v zahraničí je možno měřit vzdálenosti do 20 km až s přesností 0,5–1 m při odpovídajících fyzikálně geografických podmínkách pro šíření rádiového paprsku.

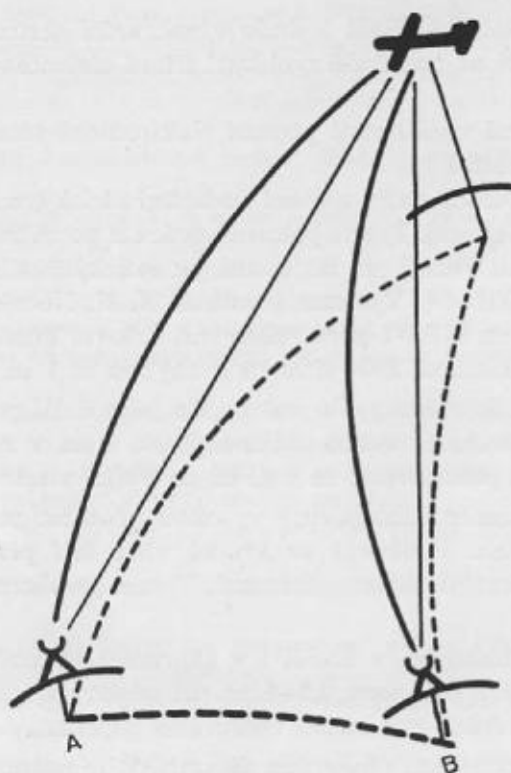
Druhým nedostatkem rádiových dálkoměrů je nutnost jejich montáže na automobily. To omezuje možnosti použití pozemních metod při budování geodetických sítí s použitím rádiových dálkoměrů. Proto se v současné době snažíme při konstrukci dálkoměrné aparatury:

1. zvýšit přesnost prací na 10–20 cm,
2. sestrojít lehčí typ, který by nekomplikoval práci v polních podmínkách.

Jestliže tyto podmínky budou vyřešeny, otevřou se pozemní radiolokaci v geodesii široké možnosti.

(Pozn. překl.: Tyto podmínky splňuje anglický přístroj teluometr, předvedený poprvé na 3. mezinárodním kursu měření délek v Mnichově v říjnu 1957. Konstrukce přístroje není zveřejněna).

Přednost rádiových dálkoměrů před jinými přístroji, včetně elektrooptických dálkoměrů, je v tom, že k měření vzdálenosti není nutná optická viditelnost. Je možné měřit v mlze, mracích a v noci, což má zvláštní význam pro geodety, zvláště vojenské.



Obr. 1.

Těsně po Velké vlastenecké válce bylo sovětské letectvo vyzbrojeno impulsními radionavigačními systémy. Tento systém, který určuje v libovolný okamžik polohu letadla v prostoru, je velmi zajímavý i pro geodety.

Mějme dvě pozemní stanice A, B (viz obr. 1) na známých trigonometrických bodech 1. nebo 2. řádu. V letounu máme řídicí radiolokátor. Radiolokátor vysílá každou mikrosekundu impuls na určené vlně ke každé pozemní stanici. Každá pozemní stanice přijme svůj impuls, zesílí jej

a vyšle zpět na téže vlně, na jaké pracuje přijímač radiolokátoru v letounu.

Známe-li čas potřebný pro cestu rádiové vlny tam a zpět a rychlost šíření vln, můžeme určit vzdálenost mezi letounem a pozemní stanicí.

Po redukci měřených vzdáleností může protínáním určit souřadnice letounu v okamžiku impulsu.

Radionavigačními přístroji můžeme řešit tyto úlohy:

a) Vybudovat radiogeodetickou síť v rajónech, kde není státní trigonometrická síť.

b) Zabezpečit polohový podklad pro fotogrammetrické mapování v měřítku 1 : 25 000 — 1 : 100 000 málo osídlených a těžce přístupných krajin.

c) Určit souřadnice libovolného bodu v terénu, máme-li jeden až dva páry stereoskopických dvojic, při nichž jsme vyslali v okamžik expozice radioimpulsy.

d) Vést přesně letoun po řadách pro letecké fotografování.

K těmto účelům můžeme použít jak impulsních, tak fázových radionavigačních systémů.

Pro zavedení radionavigačních systémů do praxe je nutno:

1. Seznámit se se způsoby měření radiolokačními přístroji a dát jim teoretický základ. Zlepšit jednotlivé součásti přístroje a sestrojít nový sčítací přístroj pro zvýšení přesnosti. Používaná aparatura sériové výroby není přizpůsobena pro geodetické účely, proto je nutno sestrojít speciální zařízení - fotoregistrátor.

Důležité je sledovat přístrojové chyby. Metodika pro zkoušení pozemních stanic a stanic v letounu je vyložena v příslušných příručkách. Zaručuje určení systematické chyby přístroje s přesností ± 3 m.

2. Vypracovat metody zpracování výsledků měření a způsoby výpočtů rovinných souřadnic z měřených stran délky 300–1000 km.

3. Technicky vyřešit otázku komplexní práce leteckých komor a radiolokační aparatury, aby bylo možno zaručit synchronisaci dějů. Synchronisace letecké komory a fotoregistrátoru palubní stanice musí být v mezích 1–2 setin sekundy, což při rychlosti letounu 200–300 m/sec dává chybu 2–6 m.

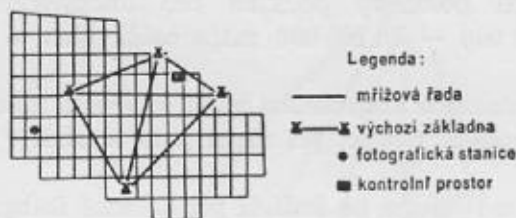
4. Vypracovat způsob budování fotogrammetrických sítí s využitím geodetických měření.

Všechny tyto otázky jsou úspěšně vyřešeny, nová metoda má praktický význam a začíná se uplatňovat v provozu. Pomocí radiolokační aparatury je možno určit v okamžiku fotografování při náletu rovinné souřadnice průmětu bodu, v němž bylo exponováno (nadiru).

Pro vyhotovení map dvě souřadnice nestačí. Je nutno určit ještě výšku H , kterou určujeme rádiovým výškoměrem. Tři souřadnice získané při náletu jsou všechny hodnoty nutné pro kancelářské vyhotovení mapy. Pro polní práce zůstane jen klasifikace leteckých snímků.

Takový způsob zabezpečení podkladů pro fotogrammetrické mapování nazýváme radiogeodetickou metodou.

Jak se organizuje letecké snímkování pro mapování v měřítku 1 : 25 000, 1 : 50 000 a 1 : 100 000, vidíme na dalším příkladě.



Obr. 2.

Na obr. 2 je vyznačen rajón K, ve kterém byly rovinné souřadnice pro vydání mapy 1 : 50 000 určovány radiogeodetickou aparaturou při leteckém snímkování. Plocha náletu činila 100 000 km². Veškeré snímkování trvalo 12 kalendářních dní.

Na snímkováném území byly rozmístěny pozemní radiolokátory, zajišťující nálety podle programu v libovolném směru. Vzdálenost mezi nimi byla 160–245 km.

Na čtyřech letounech, které prováděly snímkování v mřížkových řadách, byly instalovány radiolokátory. Ostatních pět letounů radiolokátory nemělo a provádělo snímkování ve výplňkových řadách.

Výzkumem bylo zjištěno, že při určování souřadnic průmětu nadiru v okamžik expozice pro měřítko 1 : 50 000 v málo osídlených krajích, kde přípustné odchylky jsou několikanásobně zvýšeny, postačí prokládat s radiolokační aparaturou pouze mřížové řady vzdálené od sebe ve směru poledníku 40 km a ve směru rovnoběžek 20 km. Tato mřížová síť snímkových řad umožňuje vytvořit aerotriangulaci a radiogeodeticky síť s přesností potřebnou pro sestavení mapy.

Kromě radiolokační aparatury byly na letounu instalovány dvě komory. AFA-37 formátu 18×18 cm a AFA-33/20 s ohniskem 200 mm a formátu 30×30 cm. Komora AFA-33/20 sloužila pouze pro klasifikaci leteckých snímků ve velkém měřítku.

Před započítím prací byla radiolokační aparatura instalována na šestikilometrové základně. Při radiolokačních měřeních nelze s dostatečnou přesností určit meteorologické faktory a různé poruchy, mající vliv na rychlost šíření rádiových vln. Proto pro zjištění zbytkových chyb aparatury a systematických chyb vznikajících z neznalosti rychlosti šíření elektromagnetických vln je nutno mít v terénu speciální kontrolní body. V rajónu byly dva. Jeden představovala fotografická stanice s fototheodolitem, druhý prostor s kontrolními body v terénu, jejichž souřadnice byly určeny geodeticky.

Kontrolní fotografická stanice pracovala takto:

Při náletu letounu nad fotografickou stanicí obdržel fototheodolit z letounu impuls, který pomocí speciálního zařízení otevřel uzávěrku a tím vyfotografoval letoun. V též okamžik palubní stanice určila vzdálenosti k palubním stanicím. Tímto způsobem je možno v též okamžik určit souřadnice letounu nad fotografickou stanicí $2\times$. Jednou výpočtem z pozemních stanic, po druhé ze snímku z fototheodolitu. Rozdíl dává opravy (zbytkové chyby) v práci pozemní stanice.

Zbytkové chyby v kontrolním prostoru se určují takto:

V terénu vybereme prostor s dostatečně ostrou situací a určíme v terénu souřadnice některých situačních bodů dobře identifikovatelných na snímku. Letoun letí nad kontrolním prostorem a fotografuje terén současně s radiolokačním určováním souřadnic. Pomocí fotogrammetrického zpracování je možné určit souřadnice nadíru $2\times$. Jednou z radiolokačního určení a jednou z geodetických souřadnic. Rozdíl dává zbytkovou chybu.

Hlavní přístrojová chyba vzniká změnou napětí elektromagnetického pole v okamžiku činnosti radiogeodetické stanice a dosahuje až 40 m ve výsledné délce.

Po proložení mřížových řad se nalétávají výplňkové řady. Pro vyrovnání aerotriangulace výplňkových řad se jako výchozí použijí identické body z mřížových řad.

Polní klasifikace leteckých snímků se neprovádí. Klasifikaci pomáhají vypracované etalony typického terénu.

Tímto způsobem se celý cyklus polních prací uzavírá:

- v geodetickém navázání čtyřech pozemních stanic, fotografické stanice a kontrolního prostoru;
- v radiogeodetických měřeních při leteckém snímkování mřížových řad;
- v plošném leteckém snímkování;
- ve vypracování etalonů pro kamerální klasifikaci leteckých snímků.

V období kamerálního zpracování se provede zpracování radiogeodetických měření, jehož výsledkem jsou souřadnice nadiru v okamžiku expozice, a sestrojí se s vyrovnáním prostorová síť mřížových a výplňkových řad. Potom se kamerálně klasifikují letecké snímky a vyhotoví se mapa na stereoprojektoru, stereoplanigrafu a multiplexu.

K vyjmenovaným pracím, jakoby doplňkovým k obvyklým způsobům práce patřily:

- a) určení přístrojových chyb aparatury – 150 denních norem;
- b) geodetické navázání pozemní stanice, fotografické stanice a kontrolních bodů – 280 denních norem;
- c) radiogeodetické měření – 400 denních norem;
- d) zpracování radiogeodetických měření – 760 denních norem.

Celkem 1590 denních norem, z toho polních 830 a kamerálních 760.

Pro polní přípravu leteckých snímků na téže ploše obvyklým způsobem by bylo potřeba 8000 denních norem, to je asi 5x–6x více.

Pro zjištění skutečné přesnosti mapy vyhotovené touto metodou bylo vybráno 24 listů mapy měřítka 1 : 50 000 ve třech typických prostorech. Při polní kontrole map se ukázalo, že jejich přesnost nevybočuje z odchylek povolených pro neosídlené krajiny. Výsledky prověrky v prostoru K jsou uvedeny v tabulce:

| Název prostoru | Počet kontrolních bodů | | Střední chyba v metrech | |
|----------------|------------------------|-----------|-------------------------|----------|
| | polohových | výškových | v poloze | ve výšce |
| severní | 178 | 178 | ± 25 | ± 4,5 |
| jižní | 269 | 323 | ± 10 | ± 5,0 |
| východní | 52 | 292 | ± 30 | ± 4,7 |

V roce 1955 v prostoru A bylo zabezpečeno radiogeodetickou metodou mapování v měřítku 1 : 100 000 na ploše 300 000 km². Přitom bylo provedeno pouze polohové zabezpečení snímků. Práce byla provedena za 2,5 měsíce. Podmínky práce byly dobré.

Mřížové řady v tomto prostoru byly prokládány podél poledníků po 40 km, podél rovnoběžek po 80 km. Tato síť byla dostatečná pro polohové zajištění fotogrammetrického mapování v měřítku 1 : 100 000.

V roce 1952 v prostoru G bylo provedeno radiogeodetické zabezpečení leteckého snímkování pro měřítko 1 : 25 000 na ploše 4200 km² a měřítko 1 : 50 000 na ploše 12 500 km² v osídleném území.

V tomto prostoru byla organizace práce jiná, poněvadž bylo potřeba zachovat vysokou přesnost polohového zabezpečení leteckých snímků.

Práce byla provedena dvěma pozemními stanicemi ze dvou základů. Mřížové řady se neprokládaly. Každá řada leteckých snímků v měřítku 1 : 25 000 se zabezpečovala radiogeodetickým měřením. Při mapování v měřítku 1 : 50 000 se připouštěly odchylky od tohoto požadavku a některé řady se fotografovaly bez radiolokačního zařízení. Polohová přesnost ověřená v terénu nepřesáhla ± 25 m.

Pokus vybudování radiogeodetické sítě byl proveden v severním a středoasijském prostoru měřením čtyřúhelníků. V severním prostoru byl změřen jeden čtyřúhelník. Měření spočívalo v tom, že letoun s radiolokační aparaturou přeletěl několikrát spojnicí pozemních stanic a změřil vzdálenosti k oběma stanicím. Pro zvýšení přesnosti bylo použito dvou letounů, které několikrát přeletěly napříč měřené délky.

Přesnost měření byla ± 10 m z jednoho přeletu, střední chyba výsledku z 5–6 přeletů byla ± 3 –5 m.

Tímto způsobem je možno provést s dostatečnou přesností vybudování radiogeodetické sítě. Tato úloha se může vyskytnout tam, kde není dostatečně hustá trigonometrická síť a je třeba provést mapování v měřítku 1 : 50 000 až 1 : 100 000, např. v severních prostorech SSSR. V tom případě se může vybudovat radiogeodetická síť z čtyřúhelníků blízkých čtverci. Na vrcholy čtverce se umístí pozemní radiogeodetické stanice. Strany čtyřúhelníka se určí přelétáváním spojnice letounem s radiolokátorem.

Rozvinutí radiogeodetické sítě se provádí současně s leteckým snímkováním. Je žádoucí, aby v síti bylo určeno několik astronomických azimutů a Laplaceových bodů. Radiogeodetická síť může být určena s přesností 1 : 50 000 až 1 : 70 000.

Prakticky bylo prokázáno, že radiogeodetická metoda při zabezpečení podkladu pro vydání map 1 : 25 000 až 1 : 100 000 je progresivní a několikrát rentabilnější než obvyklé metody při mapování v málo osídlených krajinách.

Radiogeodetická metoda je podstatně přesnější než metoda astronomicko-gravimetrická.

Zvláštnost této metody je také v tom, že jestliže na území určeném pro mapování je nedostatečně rozvinuta geodetická síť nebo jestliže vůbec schází, je možné rozvinout radiogeodetickou síť na ohromném území v jediném systému a umožnit tak v krátké době letecké snímkování pro vydání mapy. Přitom v málo osídlených krajinách je možno současně při

snímkování určovat i výšky terénu s chybou $\pm 3-6$ m pomocí rádiového výškoměru a statoskopu.

V nejbližší době je možno očekávat přesnější aparatury, které budou v provozu jednodušší. Konstrukce takovéto aparatury je hlavním úkolem výroby geodetických strojů.

Pro budování geodetických sítí vysoké přesnosti je nutno zavést elektrooptické metody založené na šíření světelných vln. Existují dva typy přístrojů; vysoce přesný elektrooptický dálkoměr pro budování geodetických sítí 2. řádu a přesný topografický dálkoměr.

Je nutno konstatovat, že v nejbližší době nejsou perspektivy pro rozvinutí radiolokace při budování radiogeodetické sítě vysoké přesnosti.

Radiogeodesie dojde rozšíření při budování sítě pevných bodů teprve tehdy, až budou vyrobeny přesné a lehce přenosné rádiové dálkoměry. Hlavní nedostatek radiolokační aparatury je v tom, že se nepadno přemísťuje.

Nedostatek elektrooptických dálkoměrů je v tom, že jich nemůžeme použít, jestliže nemáme optickou viditelnost (v mracích, v mlze), i když rozvinutí techniky založené na využití ultrakrátkých vln by odstranění tohoto nedostatku umožnilo.

Radiolokační aparatura upevněná v letounu umožňuje zabezpečení leteckého snímkování při náletu, aniž bychom měli vyřešenu geodetickou síť. Světlolokace tuto možnost nedává. Naproti tomu světlolokace umožňuje vybudování pozemní geodetické sítě s vysokou přesností. Ostatní práce se provádějí obvyklými pozemními metodami. V tom je nevýhoda světlolokace ve srovnání s radiolokací.

Komplexní zavedení uvedených metod je značným technickým pokrokem v geodesii a fotogrammetrii, proto na zdokonalení těchto metod je třeba zaměřit v nynější době vědecký výzkum.

Překlad referátu předneseného na konferenci vysokých škol SSSR a uveřejněného ve „Zprávách vysokých škol“ v prosinci 1957.

Přeložil:
inž. kpt. Věnek Pavlica

Plocha ČSR

Zavedení elipsoidu Krasovského v ČSR a dokončení mapového díla 1 : 25 000 vedlo i k úkolu ověřit dosavadní údaje týkající se velikosti státního území.

V „Malém atlase světa“ (ÚSGK, 1956, str. 73 textové části) se uvádí plocha ČSR hodnotou 127 827 km²; v „Malém atlase světa“, příruční vydání (ÚSGK, 1957, str. 38) hodnotou 127 858,55 km². Z jakých podkladů se vyšlo a jakým způsobem se k těmto číslům dospělo, není nám známo. Plochy uvedené ve starších pramenech z let před r. 1938 nelze pro srovnání použít vzhledem ke značným změnám státní hranice (v okolí Bratislavy, hranice s SSSR atd.)

K přezkoušení těchto údajů vedlo několik závažných okolností:

1. V ČSR byla zavedena nová referenční plocha - elipsoid Krasovského - která je výsledkem zpracování velmi bohatého geodetického materiálu, a tudíž ze všech užívaných referenčních ploch nejsprávnější. Je jasné, že už sama změna referenčního elipsoidu znamená základní změnu v určení rozlohy určitého území.
2. Bylo vytvořeno nové mapové dílo, zpracované nejmodernějšími technologickými postupy, a tudíž dílo skýtající pro měření největší možnou přesnost.
3. Státní hranice je asi na polovině své délky vynesena podle souřadnic, čímž se její plocha v mapě podstatně upřesnila.
4. Mapa byla vyhotovena v období několika málo let, takže v průběhu státní hranice nedošlo k velkým změnám od doby vydání map. Pokud byla vyrovnána hranice s Polskou lidovou republikou jsou tyto změny nepatrné a ve svém souhrnu se na výsledné ploše projeví velmi málo.

Ani jednu z těchto vlastností nebylo možno předpokládat u map starších.

I když stanovení velikosti plochy státního území je jeden z podružných úkolů, jimž mapa slouží, ukázaly se i zde nové mapy jako vynikající podklad.

Novým měřením byla zjištěna plocha ČSR

127 913 km²

ve střední nadmořské výšce 477 m. Plocha v zobrazovací rovině je

127 893,74 km².

Střední nadmořská výška byla vzata z „Malého atlasu světa“ (ÚSGK, 1956).

Jak už bylo řečeno, změna elipsoidu - v našem případě nahrazení elipsoidu Besselova elipsoidem Krasovského - vede nutně ke změně plochy určitého území. Pod pojmem „plocha území“ rozumíme totiž plochu průmětu tohoto území na referenční ploše. Změní-li se rozměry referenční plochy, její tvar nebo její poloha vůči zemskému tělesu, změní se i velikost průmětu a tedy i plocha území. Plocha na skutečném povrchu země se samozřejmě při změně referenční plochy měnit nemůže.

| | | |
|---|-------|----------------------|
| <u>skutečná plocha území na povrchu země</u> | | skutečný povrch země |
| <u>plocha území vzhledem k Bess. elipsoidu</u> | | Besselův elipsoid |
| <u>plocha území vzhledem ke Kras. elipsoidu</u> | | Krasovského elipsoid |

Plocha povrchu elipsoidu je dána vztahem

$$P = 4\pi b^2 \left(1 + \frac{2}{3}e^2 + \frac{3}{5}e^4 + \frac{4}{7}e^6 + \dots \right).$$

kde b , e^2 jsou konstanty elipsoidu.

Zanedbáním členů s e^4 a vyšších a položením $a^2 \doteq b^2 (1 + e^2)$ dostaneme přibližný vzorec pro povrch

$$P = \frac{4}{3} \pi (2a^2 + b^2).$$

Abychom stanovili velikost změny, diferencujeme tuto rovnici.

Dostaneme

$$dP = \frac{8}{3} \pi (2a \cdot da + b \cdot db).$$

Diferenciály nahradíme rozdílem poloos obou elipsoidů (index B je pro elipsoid Besselův, index K je pro elipsoid Krasovského):

| | |
|------------------------------------|------------------------------------|
| $a_B = 6\,377\,397,1550 \text{ m}$ | $b_B = 6\,356\,078,9632 \text{ m}$ |
| $a_K = 6\,378\,245,0000 \text{ m}$ | $b_K = 6\,356\,863,0188 \text{ m}$ |
| $da \doteq 847,8 \text{ m}$ | $db \doteq 784,1 \text{ m}$ |

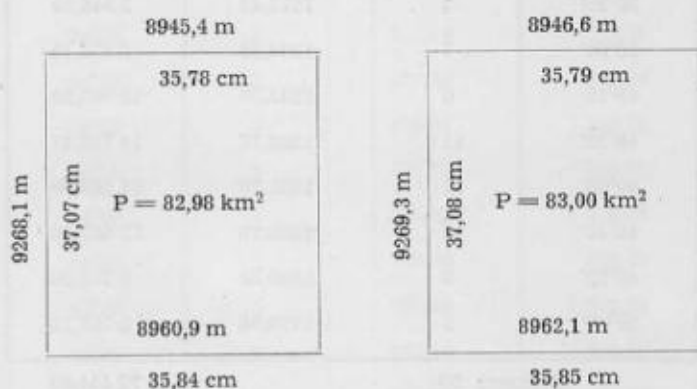
Zvětšení velikosti povrchu celého elipsoidu Krasovského proti elipsoidu Besselovu je

$$dP = \frac{8}{3} \pi (2 \cdot a_B \cdot 847,8 + b_B \cdot 784,1)$$

a po vyčíslení $dP = 132\,343 \text{ km}^2$.

Chceme-li posoudit vliv změn užitých referenčních ploch na výsledky měření rozlohy určitého území, je nutno zjistit, jak se tyto změny projeví graficky na mapovém listě, na němž měření provádíme.

Na levém obrázku je mapa 1 : 25 000 na elipsoidu Besselově, na pravém táž mapa na elipsoidu Krasovského.



Vidíme, že rozměry mapy jsou na Krasovského elipsoidu větší, což vyplývá z toho, že rozměry Krasovského elipsoidu jsou větší než elipsoidu Besselova. Zmenšíme-li skutečně rozměry obou mapových listů do měřítka 1 : 25 000, liší se vzájemně o 0,1 mm. Graficky se tedy změna plochy v důsledku změny elipsoidu neprojeví. Z toho plyne, že při přímém měření ploch např. planimetrem dostaneme stejné výsledky, ať měříme na té nebo oné mapě.

Jinak je tomu, určíme-li plochu mapového listu počteně. Změna elipsoidu způsobuje u map uvedených na obrázcích změnu plochy celkem o 0,02 km².

Plocha pravoúhlého elipsoidického lichoběžníka mezi rovnoběžkami $\varphi = 47^{\circ}40'$ a $\varphi = 51^{\circ}10'$ (nejjižnější a nejsevernější mapa 1 : 50 000 v ČSR) a mezi poledníky $\lambda = 12^{\circ}$ a $\lambda = 22^{\circ}45'$ (nejzápadnější a nejvýchodnější mapa 1 : 50 000 v ČSR) je

na elipsoidu Besselově: 303 510,02 km²,

na elipsoidu Krasovského: 303 591,61 km².

Rozdíl tedy je 81,59 km², z čehož připadá na ČSR (úměrně k její ploše) asi 35 km².

Tabulka I.
(mapy 1 : 100 000)

| Šířka B | Počet listů | Plocha jednotlivě km ² | Plocha celkem km ² |
|------------|----------------|---|-------------------------------------|
| 50°40' | | | |
| 50°20' | 3 | 1315,43 | 3 946,29 |
| 50°00' | 7 | 1324,59 | 9 272,13 |
| 49°40' | 9 | 1333,70 | 12 003,30 |
| 49°20' | 11 | 1342,77 | 14 770,47 |
| 49°00' | 11 | 1351,79 | 14 869,69 |
| 48°40' | 10 | 1360,76 | 13 607,60 |
| 48°20' | 6 | 1369,68 | 8 218,08 |
| 48°00' | 2 | 1378,56 | 2 757,12 |

Celkem: 59

79 444,68

Výsledná plocha: 79 444,68 km².

Měření plochy např. našeho území z map, kterými prochází státní hranice, se provádí přímo na těchto mapách. Protože se změna elipsoidu na rozměru mapových listů graficky neprojeví, naměříme na těchto mapách tutéž hodnotu, jako na mapách s jiným referenčním elipsoidem. Rozdíl by bylo nutno přičíst na vrub chyb měření, nepřesnosti a zastaralosti starších map. Plochy map, jimiž neprochází státní hranice, tj. plochy úplných listů, jsou vypisovány z kartografických tabulek nebo počítány. Protože jde o plochy zjištěné početně, vztahují se k referenčnímu elipsoidu určitého mapového díla. Zde by se při porovnání výsledků ze dvou různých mapových děl plně projevil rozdíl vyplývající z různých referenčních ploch.

Zjištění velikosti ČSR bylo provedeno jednak měřením ploch na neúplných mapových listech, jednak sestavením výměr úplných mapových listů.

Na přehledu kladu listů (viz přílohu 1) byly vyznačeny úplně mapové listy měřítek 1 : 100 000, 1 : 50 000 a 1 : 25 000. Mapové listy jednotlivých měřítek byly rozděleny do skupin podle zeměpisné šířky (směrem k severu se výměry map zmenšují!) Počty listů a jejich výměry jsou uvedeny v tabulce 1 až 3.

Tabulka 2.
(mapy 1 : 50 000)

| Šířka B | Počet listů | Plocha jednotlivě km ² | Plocha celkem km ² |
|------------|----------------|---|-------------------------------------|
| 50°50' | | | |
| 50°40' | 2 | 327,13 | 654,26 |
| 50°30' | 2 | 328,28 | 656,56 |
| 50°20' | 5 | 329,43 | 1 647,15 |
| 50°10' | 1 | 330,58 | 330,58 |
| 50°00' | 4 | 331,72 | 1 326,88 |
| 49°50' | 2 | 332,86 | 665,72 |
| 49°40' | 5 | 333,99 | 1 669,95 |
| 49°30' | 2 | 335,13 | 670,26 |
| 49°20' | 2 | 336,26 | 672,52 |
| 49°10' | 9 | 337,38 | 3 036,42 |
| 49°00' | 10 | 338,51 | 3 385,10 |
| 48°50' | 8 | 339,63 | 2 717,04 |
| 48°40' | 2 | 340,75 | 681,50 |
| 48°30' | 3 | 341,86 | 1 025,58 |
| 48°20' | 1 | 342,98 | 342,98 |
| 48°10' | 6 | 344,09 | 2 064,54 |
| 48°00' | 1 | 345,19 | 345,19 |
| 47°50' | 4 | 346,30 | 1 385,20 |

Celkem: 69

23 277,43

Výsledná plocha: 23 277,43 km²

Do téhož přehledu byly zakresleny listy, jimiž prochází státní hranice. Výměra vlastního území na těchto listech byla planimetrována.

Pro každý mapový list byl založen arch, na kterém byla napsána nomenklatura listu, a do vytištěné kilometrové sítě byl zakreslen schematicky průběh státní hranice a přibližně rám mapy (viz přílohu 2).

Tabulka 3.
(mapy 1 : 25 000)

| Šířka B | Počet listů | jednotlivě Plocha km ² | Plocha celkem km ² | Šířka B | Počet listů | Plocha jednotlivě km ² | Plocha celkem km ² |
|---------|-------------|-----------------------------------|-------------------------------|---------|-------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| 50°55' | | | | 49°20' | | | |
| 50°50' | 1 | 81,57 | 81,57 | 49°15' | 3 | 84,28 | 252,84 |
| 50°45' | 3 | 81,71 | 245,13 | 49°10' | 5 | 84,42 | 422,10 |
| 50°40' | 9 | 81,86 | 736,74 | 49°05' | 6 | 84,56 | 507,36 |
| 50°35' | 2 | 82,00 | 164,00 | 49°00' | 6 | 84,70 | 508,20 |
| 50°30' | 7 | 82,14 | 574,98 | 48°55' | 7 | 84,84 | 593,88 |
| 50°25' | 2 | 82,29 | 164,58 | 48°50' | 3 | 84,98 | 254,94 |
| 50°20' | 4 | 82,43 | 329,72 | 48°45' | 8 | 85,12 | 680,96 |
| 50°15' | 1 | 82,57 | 82,57 | 48°40' | 2 | 85,26 | 170,52 |
| 50°10' | 6 | 82,72 | 496,32 | 48°35' | 11 | 85,40 | 939,40 |
| 50°05' | 2 | 82,86 | 165,72 | 48°30' | 2 | 85,54 | 171,08 |
| 50°00' | 5 | 83,00 | 415,00 | 48°25' | 4 | 85,68 | 342,72 |
| 49°55' | 1 | 83,14 | 83,14 | 48°20' | — | — | — |
| 49°50' | 5 | 83,29 | 416,45 | 48°15' | 4 | 85,95 | 343,80 |
| 49°45' | 2 | 83,43 | 166,86 | 48°10' | — | — | — |
| 49°40' | 2 | 83,57 | 167,14 | 48°05' | 7 | 86,23 | 603,61 |
| 49°35' | 1 | 83,71 | 83,71 | 48°00' | 1 | 86,37 | 86,37 |
| 49°30' | — | — | — | 47°55' | 2 | 86,51 | 173,02 |
| 49°25' | 3 | 83,99 | 251,97 | 47°50' | 1 | 86,64 | 86,64 |
| 49°20' | 4 | 84,14 | 336,56 | 47°45' | 2 | 86,78 | 173,56 |

Celkem: 134

11 273,16

Výsledná plocha: 11 273,16 km²

Tabulka 4.

(Planimetrované mapy 1 : 25 000)

| List mapy 1 : 100 000 | Počet listů | Plocha km ² | List mapy 1 : 100 000 | Počet listů | Plocha km ² |
|--------------------------|----------------|---------------------------|--------------------------|----------------|---------------------------|
| M-33-29 | 2 | 62,42 | M-33-118 | 5 | 223,46 |
| M-33-30 | 2 | 10,04 | M-33-125 | 6 | 198,12 |
| M-33-31 | 2 | 17,82 | M-33-126 | 3 | 107,73 |
| M-33-40 | 5 | 276,09 | M-33-130 | 6 | 278,23 |
| M-33-41 | 6 | 330,13 | M-33-142 | 3 | 78,85 |
| M-33-42 | 9 | 371,87 | M-33-143 | 4 | 223,53 |
| M-33-43 | 7 | 403,22 | L-33-11 | 3 | 99,95 |
| M-33-44 | 6 | 187,46 | L-33-12 | 6 | 240,02 |
| M-33-45 | 2 | 0,97 | M-34-61 | 1 | 32,58 |
| M-33-49 | 1 | 9,57 | M-34-73 | 6 | 353,99 |
| M-33-50 | 6 | 265,01 | M-34-74 | 5 | 159,32 |
| M-33-51 | 7 | 234,37 | M-34-86 | 5 | 275,78 |
| M-33-52 | 1 | 76,50 | M-34-87 | 7 | 305,36 |
| M-33-56 | 1 | 81,20 | M-34-88 | 5 | 191,80 |
| M-33-57 | 10 | 504,73 | M-34-89 | 3 | 116,68 |
| M-33-58 | 2 | 77,70 | M-34-90 | 3 | 160,36 |
| M-33-59 | 3 | 113,05 | M-34-91 | 7 | 260,74 |
| M-33-61 | 11 | 449,02 | M-34-92 | 5 | 163,61 |
| M-33-69 | 1 | 56,79 | M-34-100 | 3 | 138,52 |
| M-33-70 | 8 | 292,36 | M-34-101 | 3 | 116,22 |
| M-33-71 | 5 | 320,01 | M-34-102 | 1 | 63,35 |
| M-33-72 | 10 | 421,17 | M-34-104 | 1 | 79,98 |
| M-33-73 | 4 | 75,89 | M-34-105 | 6 | 251,90 |
| M-33-74 | 3 | 225,35 | M-34-106 | 2 | 38,68 |
| M-33-84 | 2 | 149,41 | M-34-117 | 5 | 219,82 |
| M-33-86 | 7 | 356,17 | M-34-125 | 3 | 169,32 |
| M-33-98 | 1 | 1,80 | M-34-126 | 4 | 12,78 |
| M-33-99 | 7 | 317,06 | M-34-127 | 6 | 272,68 |
| M-33-102 | 1 | 84,28 | M-34-128 | 5 | 296,34 |
| M-33-103 | 1 | 76,38 | M-34-129 | 6 | 148,19 |
| M-33-111 | 1 | 27,58 | M-34-134 | 2 | 93,20 |
| M-33-112 | 7 | 369,73 | M-34-135 | 5 | 196,01 |
| M-33-113 | 1 | 74,68 | M-34-136 | 8 | 330,46 |
| M-33-114 | 6 | 360,21 | M-34-137 | 4 | 197,60 |
| M-33-115 | 4 | 103,45 | L-34-1 | 7 | 269,47 |
| M-33-116 | 6 | 295,03 | L-34-2 | 5 | 188,45 |
| M-33-117 | 6 | 156,87 | | | |

Celkem: 73 13 898,47

Výsledná plocha: 13 898,47 km²

Plocha určená k planimetrování byla rozdělena na část vytvořenou celými čtverečnými kilometry a na část kolem rámu mapy a podél státní hranice. Tato druhá část byla dále rozdělena na číslované úseky a její plocha byla po úsecích změřena nezávisle dvakrát, jiným pracovníkem a v jiný den, aby nebylo možno do výsledku zavést chybu. Výsledky byly zapsány do archu teprve po provedeném obojím měření.

Oddělením celých čtverečných kilometrů zbyla k planimetrování celkem malá plocha, což dobře vyhovovalo vzhledem k nízké přesnosti planimetrů.

Planimetrování bylo provedeno dvěma polárními planimetry:

planimetrem Fričovým s hodnotou vern. jednice 4 000 m²

a planimetrem Neuhöferovým s hodnotou vern. jednice 5 000 m²

pro měřítko 1 : 25 000. Neuhöferův planimetr byl výhodnější konstrukce a přesnější.

Zjištěné výměry částí jednotlivých listů 1 : 25 000 byly sestaveny do skupin podle odpovídajících map 1 : 100 000. Součty skupin jsou uvedeny v tabulce 4.

V tabulce 5 je proveden součet výsledků tabulek 1 až 4, který je roven celkové ploše státního území v zobrazovací rovině.

Tabulka 5.

| Výsledná plocha z tabulky | km ² |
|----------------------------------|-----------------|
| 1 | 79 444,68 |
| 2 | 23 277,43 |
| 3 | 11 273,16 |
| 4 | 13 898,47 |
| plocha v rovině zobrazení celkem | 127 893,74 |

Dohodou ratifikovanou v dubnu 1959 mezi ČSR a PLR byly provedeny drobné úpravy průběhu společné hraniční čáry. V důsledku těchto drobných úprav zvětšila se plocha ČSR o 368,55 ha a současně zkrátila délka hranic o 80 km.

| | |
|-----------------------------------|----------------------------|
| Plocha ČSR v rovině zobrazení je: | 127 893,74 |
| | + 3,69 |
| Celkem | 127 897,43 km ² |
| Ve stř. nadm. výšce 477 m | 127 917 km ² |

Plocha byla ze zobrazovací roviny převedena do střední nadmořské výšky 477 m.

Výsledky měření planimetrem byly opraveny o tyto opravy.

1. Oprava ze systematické chyby planimetru.

Planimetry při přesném nastavení indexu na pojízdném rameni podle tabulky připojené k planimetru vykazovaly malou chybu. Přeměřením kontrolních ploch jsme zjistili, že je přibližně úměrná velikosti měřené plochy. Protože šlo při měření o plochy malé, dosáhla oprava jen zcela výjimečně větší hodnoty než 0,05 km².

2. Oprava ze srážky papíru byla zjišťována vždy pro tu část listu, v níž leželo planimetrované území. Pro stanovení velikosti oprav byly měřeny rozměry kilometrové sítě pravítkem s dělením 0,2 mm opravy byly počítány ze vzorce $\Delta P = p \cdot P'$ kde P' je plocha naměřená a $p = (D - D') : D + (V - V') : V$. D, V jsou správné, D', V' měřené rozměry kilometrové sítě.

3. Oprava ze zkreslení byla vypisována z „Kartografických tabulek“ (Štorkán, SNTL). Opravy jsou počítány z přibližného vzorce pro zkreslení ploch

$$m_{pl.} - 1 = \frac{Y^2}{R^2}$$

a jsou sestaveny s krokem $Y = 10$ km.

Y -ová souřadnice procházející přibližně středem území byla proto zaokrouhlována na celé desítky kilometrů. Znamená to, že při zaokrouhlování na nejbližších 10 km mohla nastat chyba o jeden celý desetikilometrový pás. Předpokládejme list na okraji pásu, u něhož je oprava počítána pro téměř celou plochu. Listy na okraji pásu s max. plochou jsou u rovnoběžky 47°45' s plochou 86,6 km².

Pro $Y = 270$ je oprava 1299 m²/km² a pro $Y = 280$ je oprava 1189 m²/km². Chybné zaokrouhlení by způsobilo tedy max. chybu 0,01 km². Podobně je tomu s listy u 50° šířky. U těchto několika listů byla proto souřadnice Y zaokrouhlována na 5 km a tabulka lineárně interpolována.

Pro posouzení přesnosti planimetrování byly porovnány výsledky dvojího měření ploch. Byly sečteny všechny naměřené hodnoty větší (1. měření) a všechny hodnoty menší (2. měření):

| | |
|-----------|----------------------------|
| 1. měření | : 5 193,91 km ² |
| 2. měření | : 5 177,31 km ² |
| průměr | : 5 185,61 km ² |

Rozdíl mezi 1. a 2. měřením je 16,60 km², tj. 0,32 ‰ měřené plochy.

Planimetrování bylo provedeno u map M-33-51-A na listě 1 : 50 000, protože mapa M-33-51-A-b nebyla k dispozici.

Zjišťování deformace leteckého filmu

V současné době, kdy se mapy většinou zhotovují fotogrammetricky, jsou kladené vysoké požadavky na fotografický materiál používaný k těmto účelům. Vezmeme-li v úvahu, že optika dnešních leteckých komor je tak dokonalá, že vady objektivu jsou minimální, rozlišovací schopnost je uprostřed snímku až 250 čar na milimetr ([1], str. 34), je potřeba rozměrově neměnného materiálu stále větší. Nejideálnější pro práce, vyžadující nejvyšší měřickou přesnost, jsou fotografické desky s vysokou rozlišovací schopností, jejichž podklad je neměnný a zaručují tak správné výsledky. Při obzvláště přesných pracích se tohoto negativního materiálu dodnes používá. Nevýhoda desek spočívá v jejich křehkosti, velké váze a obtížné manipulaci při snímání. Film tyto nevýhody nemá, a proto se nové letecké komory stavějí většinou pro svitkový fotografický materiál.

Aby mohly továrny vyhovět požadavkům kladeným na fotogrammetrický film, zkoušejí se stále nové podkladové látky, jejichž deformace by se pohybovala v přípustných mezích. Do nedávna byl používán materiál s vysoce vznětlivým nitrocelulosem podkladem silně se deformujícím, který nevyhovoval fotogrammetrickým účelům, a proto bylo zkoušeno použití jiných podkladových látek, jako acetát-, acetyl- a triacetát-celulosa, z nichž poslední se deformuje nejméně a byla s ní provedena řada zkoušek (jak podrobně popisuje Michajlov v časopise Geodezija i kartografija 6—1957.)

Deformace na leteckých filmech se projevují různým způsobem. Podle druhů je můžeme rozdělit takto:

1. Pravidelná deformace - je zaviněna celkovou změnou rozměrů jak v ose x , tak v ose y ; projevuje se jako měřítková odchylka snímku a její vliv lze na moderních universálních fotogrammetrických strojích odstranit změnou konstanty vyhodnocovacích komor.

2. Nepravidelná místní deformace - je způsobena buďto nepravidelnými změnami podkladu, nebo posunutím emulze v nepatrných mezích na ploše filmu. Jejich vliv se nedá eliminovat, protože jsou náhodně rozmístěny a jsou proto zdrojem měřických chyb.

3. Rozdíl mezi příčnou a podélnou deformací - je způsoben diferencí deformace ve směru podélném a příčném, což je pravděpodobně zaviněno způsobem výroby filmu v pásech.

Je proto bezpodmínečně třeba, aby každý nový materiál, který má být použit k fotogrammetrickému vyhodnocení, byl nejdříve vyzkoušen,

jaká je jeho pravidelná a nepravidelná deformace a popřípadě, jak se tyto hodnoty mění v závislosti na čase a teplotě.

Cílem této práce je určit vlastnosti fotogrammetrického filmu Aerorapid D firmy Agfa, Wolfen NDR, kterého se v poslední době používá v naší topografické službě, a najít vhodnou metodu k určení deformací fotografického materiálu.

Metoda pro zjištění deformací

Aby se mohl zkoušený materiál dobře proměřovat, byla vykopírována Gautierova mřížka v kopírovacím přístroji s vývěvou, takže bylo vyloučeno eventuální prohnutí filmu a tím i posun jednotlivých proměřovaných bodů. Vyvolávání a ustálení zkoušeného filmu bylo obdobné postupům, jakých se používá v praxi. Bylo použito boraxové jemnozrné vývojky D-76 (vývojek podobného složení se používá ve VTOPÚ, jak popisuje J. Kavan ve svém čl.: Vyvolávání fotogrammetrických filmů v praxi ve Voj. top. obzoru 1957 č. 1–2), kyselého ustalovače s pyrosiřičitanem draselným. Pro úplnost uvedeme dobu působení lázni na zkoušený materiál.

| | |
|------------|---------|
| Vyvolávání | 15 min. |
| praní | 2 min. |
| ustalování | 10 min. |
| praní | 30 min. |

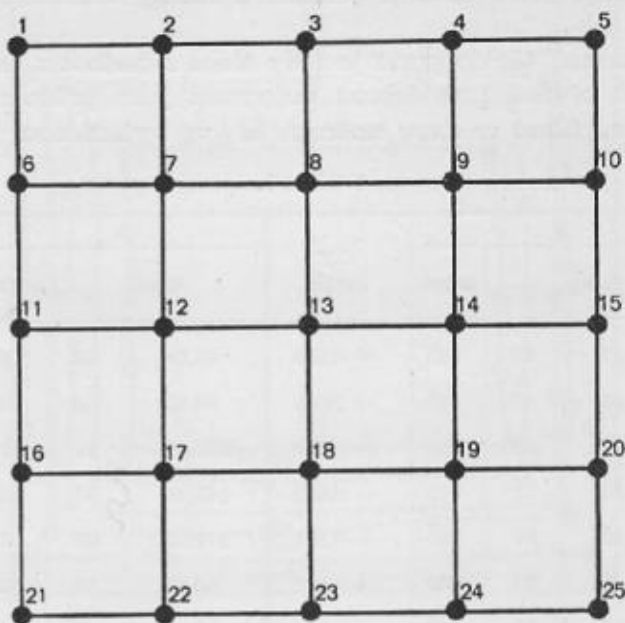
Teplota roztoků byla 19°C, prací vody 16°C.

Jelikož se v praxi suší letecké snímky exponované na dlouhé filmové pásy na speciálních sušicích bubnech, schne určitá část snímků v poloze svislé nebo šikmé, jiná část v poloze horizontální. Aby bylo posouzeno, zda poloha fotografického materiálu při schnutí nemá vliv na deformaci, byly vykopírovány celkem 4 kopie, z nichž dvě byly sušeny v poloze horizontální a dvě v poloze vertikální, volně zavěšené. Sušení probíhalo v bezprašné místnosti s teplotou 24°C. Během pozdějších měření byl film skladován volně na vzduchu, přičemž byla denně sledována teplota vzduchu v místnosti.

Pro měření byla zvolena čtvercová síť s 25 body o vzdálenosti 30 mm. Jednotlivé body byly proměřovány na Zeissově stereokomparátoru 1818, jehož přesnost nastavení (pro osu x i y 0,01 mm) plně vyhovuje požadované přesnosti měření. Před započítáním práce byla prověřena správnost mřížky i justáž stereokomparátoru.

Z mřížky byly vykopírovány negativy, které po 24 hodinách schnutí začly být proměřovány. Na všech čtyřech kopiích byly označeny měřené

body kroužkem na podkladě, dále byly opatřeny znaménky pro stejné zakládání do stereokomparátoru a nakonec označovány symboly pro rozlišení jednotlivých kopií. Dvě kopie sušené ve vodorovné poloze byly opatřeny značkami V_1 a V_2 , další dvě, sušené ve svislé poloze, značkami S_1 a S_2 . Do přístroje byly filmy vkládány vrstvou dolů a orientovány na hlavní osu mřížky ve směru y . Nastavování bylo prováděno měřickou bodovou značkou. Orientace byla velice pečlivá, protože případné pooto-



Obr. 1.

čení měřeného filmu by vyvolávalo systematické chyby, které bychom později museli početně eliminovat. Po správném urovnání byly měřeny jednotlivé body podle očíslování 1-25 (obr. 1.), přičemž byl eliminován případný vliv mrtvých chodů přístroje soustavným nastavováním měřické značky z jedné strany (zleva, shora). Čtení x a y bylo zapisováno do tabulek (viz tab. 1.) Na každý bod bylo nastaveno dvakrát a čtení zapísáno do patřičných rubrik. Z obou čtení je vypočten v další rubrice aritmetický průměr na 0,005 mm. Další sloupec obsahuje hodnoty skutečných chyb Δy , Δx vůči originální mřížce. Toto platí pro měření souřadnic jak y , tak i x . Proměření jednoho filmu trvalo 15–20 minut.

Abychom mohli pravidelnou i nepravidelnou deformaci posuzovat, byly výsledné chyby ve zvětšeném měřítku vyneseny na milimetrový papír jak to vidíme na obr. 2., kde pro přehlednost jsou vyneseny pouze obvodové změny, naměřené 1. den, 2. den, 7. den, 10. den a 17. den po oschnutí. Na ukázce jsou všechny srážkové hodnoty 20krát zvětšeny vůči velikosti obrazu. Tento způsob porovnání je však značně nepřehledný. Vhodnější je, když naměřené změny nahradíme průměrnými hodnotami vyjadřujícími pravidelnou a nepravidelnou deformaci materiálu a sestavíme je v grafy, které ukazují velikost a změny deformace v závislosti na čase.

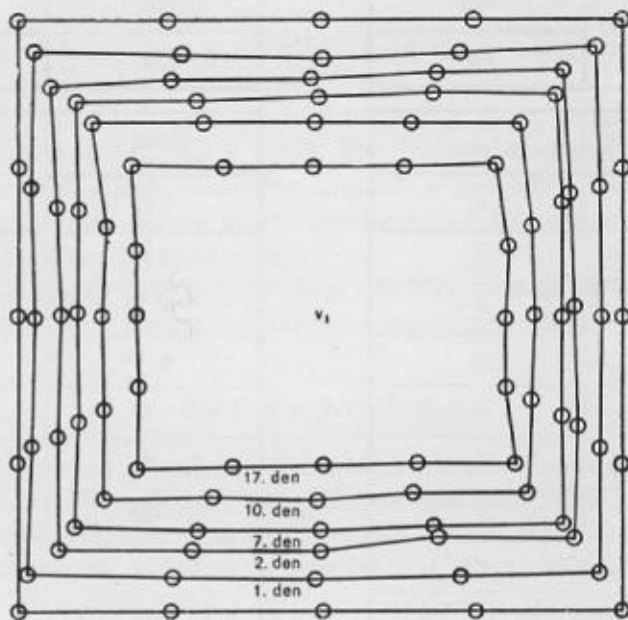
Pro sestavení těchto grafů je tedy třeba z hodnot z tabulek typu 1 početně určit předně pravidelnou deformaci jako průměrnou relativní změnu rozměrů filmu ve dvou směrech δx a δy vyjádřenou ‰.

Tabulka 1.

| Bod č. | y | | | Δy chyba | x | | | Δx chyba |
|--------|--------|----|-------|---------------------|--------|----|-------|---------------------|
| | čtení | | prům. | | čtení | | prům. | |
| 1 | 159,91 | 92 | 915 | + 0,085 | 60,09 | 08 | 085 | - 0,085 |
| 2 | 159,91 | 92 | 915 | + 0,085 | 90,05 | 05 | 050 | - 0,050 |
| 3 | 159,91 | 91 | 910 | + 0,090 | 120,02 | 01 | 015 | - 0,015 |
| 4 | 159,91 | 91 | 910 | + 0,090 | 149,98 | 99 | 935 | + 0,015 |
| 5 | 159,89 | 90 | 895 | + 0,105 | 179,96 | 96 | 960 | + 0,035 |
| 6 | 129,95 | 93 | 950 | + 0,050 | 60,09 | 08 | 085 | - 0,085 |
| 7 | 129,95 | 95 | 950 | + 0,050 | 90,05 | 05 | 050 | - 0,050 |
| • | • | • | • | • | • | • | • | • |
| • | • | • | • | • | • | • | • | • |
| • | • | • | • | • | • | • | • | • |
| • | • | • | • | • | • | • | • | • |
| 22 | 40,10 | 09 | 095 | - 0,095 | 90,05 | 05 | 050 | - 0,050 |
| 23 | 40,08 | 09 | 085 | - 0,085 | 120,02 | 02 | 020 | - 0,020 |
| 24 | 40,08 | 09 | 085 | - 0,085 | 149,96 | 97 | 965 | + 0,035 |
| 25 | 40,08 | 08 | 080 | - 0,080 | 179,94 | 94 | 940 | + 0,080 |

$$\delta x^{0/00} = \frac{\Delta x \cdot 1000}{x}, \quad \delta y^{0/00} = \frac{\Delta y \cdot 1000}{y}$$

kde Δx , Δy značí skutečné chyby převzaté z tab. 1. Měřené souřadnice (tab. 1.) odpovídají třem hodnotám x , y na originální mřížce: 0 mm, 30 mm, 60 mm. Je zřejmé, že relativní chyba naměřených hodnot pro vzdálenosti 60 mm bude určena dvakrát přesněji než při vzdálenosti



Obr. 2.

30 mm a pro vzdálenost $x = y = 0$ se určovat vůbec nedá. Budeme tedy určovat hodnoty δx , δy jako vážený aritmetický průměr ze středních hodnot δx_1 , δy_1 odvozených pro $x = y = 60$ mm a δx_2 , δy_2 pro $x = y = 30$ mm.

$$\begin{aligned} \delta x_1 &= \frac{[\Delta x_{60}]}{n \cdot 60} & \delta y_1 &= \frac{[\Delta y_{60}]}{n \cdot 60} \\ \delta x_2 &= \frac{[\Delta x_{30}]}{n \cdot 30} & \delta y_2 &= \frac{[\Delta y_{30}]}{n \cdot 30} \\ \delta x &= \frac{2 \delta x_1 + \delta x_2}{3} & \delta y &= \frac{2 \delta y_1 + \delta y_2}{3} \end{aligned}$$

V horní části tabulky 2 je uveden příklad pro uspořádání tohoto výpočtu. Počet bodů n je v našem případě pro vzdálenosti 30 i 60 mm stejný, a to $n = 10$. Výsledek δx či δy je v tabulce tučně zarámován.

Tabulka 2.

| | |
|------------------------|-------------------|
| $[\Delta x]_{60}$ | $[\Delta x]_{30}$ |
| δx_1 | δx_2 |
| $2\delta_1 + \delta_2$ | δx |

| | |
|-------|-------|
| 0,640 | 0,345 |
| 1,07 | 1,15 |
| 3,29 | 1,09 |

| | |
|-----------------------------|----------------------------|
| $\overline{\Delta x_{60}}$ | $\overline{\Delta x_{30}}$ |
| v | v |
| v | v |
| v | v |
| v | v |
| v | v |
| v | v |
| v | v |
| v | v |
| v | v |
| v | v |
| $[vv]$ | |
| $[vv]:18$ | |
| $\delta x = \sqrt{[vv]:18}$ | |

| | |
|-----------|-------|
| 0,064 | 0,034 |
| +21 | +16 |
| +21 | +16 |
| + 6 | + 6 |
| + 6 | + 6 |
| +16 | +16 |
| -24 | -19 |
| -19 | -19 |
| + 1 | -14 |
| - 4 | - 4 |
| -24 | + 1 |
| 0,004515 | |
| 0,0002508 | |
| 0,0159 | |

Nepravidelnou deformaci vyjádříme jako střední rozdíl jednotlivých měřených hodnot vůči jejich odpovídajícímu aritmetickému průměru (stejným způsobem posuzuje nepravidelnou deformaci Finsterwalder, [2], str. 43). Nejdříve tedy vypočteme aritmetické průměry z hodnot Δx_{60} , Δy_{60} , Δx_{30} , Δy_{30}

$$\overline{\Delta x_{60}} = \frac{[\Delta x_{60}]}{10}, \quad \overline{\Delta y_{60}} = \frac{[\Delta y_{60}]}{10}, \dots\dots$$

a zapíšeme do prvního řádku dolní poloviny tabulky 2. Ve sloupcích pod nimi uvedeme nyní odchylky v jednotlivých hodnot $\Delta x, \Delta y$, od příslušných průměrů $\overline{\Delta x}, \overline{\Delta y}$. Střední hodnota čtverců těchto odchylek nám bude představovat nepravidelnou deformaci $\partial x, \partial y$. Protože odchylky v jsou vztaženy k dvěma průměrným hodnotám, budou mít příslušné vzorce tento tvar

$$\partial x = \sqrt{\frac{[vv]}{2n-2}}, \quad \partial y = \sqrt{\frac{[vv]}{2n-2}}.$$

Výsledné hodnoty jsou opět tučně orámovány ve spodní části tabulky 2. Jsou vyjádřeny v milimetrech.

Poznámka: Ve sloupcích pro hodnoty v je třeba uvádět správná znaménka (jednotně $\Delta x - \overline{\Delta x}, \Delta y - \overline{\Delta y}$), aby bylo možno posoudit, zda měření nebylo systematicky ovlivněno chybou z pootočení snímku.

V tabulce 2 jsou v levé části rubriky označeny obecnými symboly, pravá část obsahuje faktické údaje.

Tímto způsobem byly přepočítány všechny naměřené hodnoty, takže z výsledků lze dobře posoudit velikost a smysl pravidelné i nepravidelné deformace.

Zpracování výsledků

V prvních dnech po zpracování srážka rapidně stoupala, později se ustálila okolo určité hodnoty, jak můžeme posoudit podle grafu č. 1.

Čtyři kopie byly proměřovány prvních 14 dní denně, další měsíc ve tří denních intervalech. Jelikož se naměřené hodnoty filmů usušených ve svislé poloze podstatně nelišily od filmů usušených vodorovně, byl počet měřených kopií zredukován na jeden sušený ve svislé (S_1) a jeden ve vodorovné poloze (V_1). Tyto dva filmy byly měřeny dále v delších časových intervalech a jejich deformace jsou zvlášť uvedeny. Pro přehlednost byly sestaveny tabulky středních hodnot deformace pro x a y . Pravidelná srážka je uvedena v promilích, nepravidelná deformace v mikronech.

Podle tabulky 3 jsou vyneseny na grafu č. 1 pravidelné změny dvou proměřovaných filmů (S_1, V_1), na grafu č. 2 nepravidelné změny. Na obou můžeme pozorovat ustálení po 14 dnech schnutí.

Graf č. 3 ukazuje vzestup pravidelné srážky měřené v delších časových intervalech přibližně po jednom měsíci. Z tohoto znázornění je patrné, že rozsah měření nebyl dostačující, protože lomená čára má stále vzestupnou tendenci. Bylo by proto zapotřebí provést měření v delším časovém období (asi 1 roku), aby se zákonitost uvažovaných změn mohla projevit, např. v závislosti na ročních obdobích.

Podle dosud uvedených výsledků můžeme učinit tento závěr;

1. pravidelná srážka filmu se ustaluje asi po 14 dnech (proto se doporučuje, aby do této doby nebylo negativů používáno k měřicím pracím) a byla pro daný film v x 3,1 ‰, v y 4 ‰.
2. nepravidelná změna filmu dosahuje v prvních 14 dnech vyšších

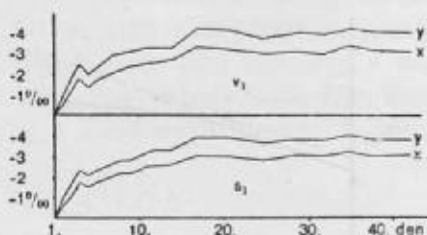
Tabulka 3.

| Datum měření | S_1 | | | | V_1 | | | |
|--------------|--------------------------|-----|--------------------------------|----|--------------------------|-----|--------------------------------|----|
| | pravidelná deformace v ‰ | | nepravidelná deformace v μ | | pravidelná deformace v ‰ | | nepravidelná deformace v μ | |
| | y | x | y | x | y | x | y | x |
| 2. 7. 1957 | 1,0 | 0,6 | 14 | 7 | 1,0 | 0,5 | 5 | 10 |
| 3. 7. | 1,6 | 1,1 | 8 | 16 | 1,0 | 1,2 | 12 | 17 |
| 4. 7. | 2,3 | 1,7 | 9 | 10 | 2,5 | 1,8 | 6 | 17 |
| 5. 7. | 2,0 | 1,5 | 11 | 7 | 2,0 | 1,4 | 6 | 9 |
| 6. 7. | 2,3 | 1,7 | 7 | 4 | 2,3 | 1,7 | 8 | 6 |
| 8. 7. | 2,6 | 2,0 | 5 | 7 | 2,9 | 2,1 | 8 | 11 |
| 9. 7. | 2,8 | 2,2 | 8 | 10 | 3,0 | 2,3 | 9 | 7 |
| 10. 7. | 2,8 | 2,2 | 14 | 9 | 3,1 | 2,3 | 8 | 8 |
| 11. 7. | 3,0 | 2,3 | 7 | 5 | 3,2 | 2,3 | 8 | 13 |
| 12. 7. | 3,1 | 2,5 | 7 | 9 | 3,3 | 2,5 | 4 | 9 |
| 13. 7. | 3,3 | 2,5 | 3 | 10 | 3,3 | 2,6 | 4 | 6 |
| 15. 7. | 3,3 | 2,6 | 5 | 5 | 3,3 | 2,7 | 2 | 4 |
| 18. 7. | 3,9 | 3,0 | 5 | 5 | 3,2 | 3,3 | 4 | 7 |
| 22. 7. | 3,9 | 3,0 | 4 | 7 | 4,1 | 3,2 | 6 | 7 |
| 26. 7. | 3,7 | 2,8 | 5 | 7 | 3,7 | 3,0 | 0 | 5 |
| 30. 7. | 3,8 | 3,0 | 6 | 4 | 4,0 | 3,0 | 10 | 0 |
| 2. 8. | 3,8 | 3,0 | 6 | 2 | 3,9 | 3,0 | 6 | 2 |
| 5. 8. | 4,0 | 3,2 | 6 | 5 | 4,2 | 3,4 | 8 | 6 |
| 8. 8. | 3,8 | 3,0 | 6 | 5 | 4,1 | 3,2 | 5 | 9 |
| 18. 8. | 3,8 | 3,1 | 3 | 5 | 4,0 | 3,0 | 2 | 3 |
| 22. 8. | 3,7 | 3,0 | 4 | 2 | 3,8 | 3,0 | 6 | 5 |

hodnot, po této době je rovněž patrné určité ustálení pod hranicí 0,01 mm. Střední hodnota této nepravidelné změny činí přibližně 8μ .

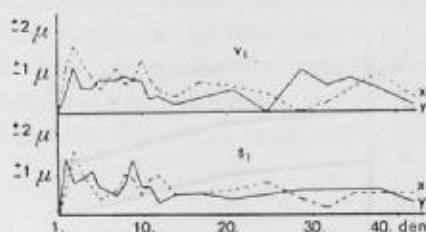
3. rozdíl mezi srážkou podélnou a příčnou je přibližně $10/100$.

Není-li film při sušení zatížen, nemá jeho poloha žádného vlivu na směr a velikost srážky.



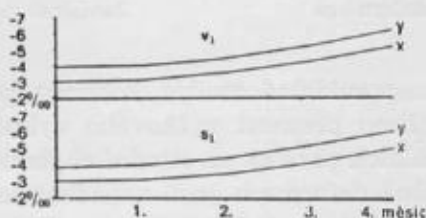
Graf 1.

Změna pravidelné deformace.



Graf 2.

Změna nepravidelné deformace.



Graf 3.

Dlouhodobé změny pravidelné deformace.

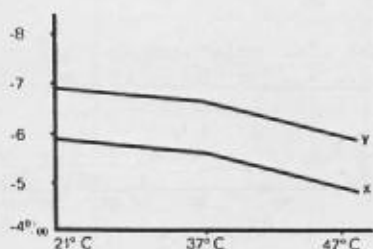
Závislost srážky na teplotě

Jelikož ve většině fotogrammetrických strojů je fotografický materiál vystaven tepelným účinkům osvětlovacích těles, bylo nutno zjistit, jakým způsobem se mění deformace v závislosti na teplotě. Bylo zjištěno, že teplota působící na film ve vyhodnocacích komorách stereoplanigrafu se pohybuje kolem 38°C , v překreslovači SEG-IV, kde je použito rtuťových výbojek, po jednohodinové práci dokonce 46°C .

Proměřovaný film byl založen do stereokomparátoru a normálně proměřen za teploty 21°C . Potom se pomocí teplometu za neustálé kontroly teploměru zahříval 1 hodinu na teplotu 37°C , načež byl znovu proměřen. Poslední měření bylo provedeno při 47°C . Všechna měření následovala těsně za sebou v době co nejkratší, aby byly vyloučeny co nejlépe všechny ostatní vlivy, kromě změny teploty. Výsledek těchto měření můžeme posoudit podle grafu č. 4 a č. 5, kde vidíme, že dobře prosušený

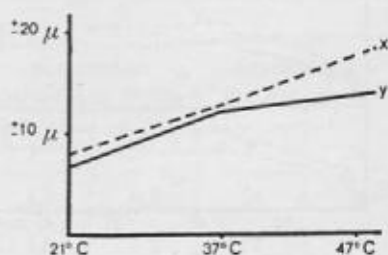
film (6 měsíců po vyvolání) se vlivem zvýšené teploty roztahuje. Jeho pravidelná deformace v x a y je téměř stejná, zato velmi roste nepravidelná deformace, která se zvětšila z 8 mikronů téměř na 20 mikronů.

Důležité zjištění je, že rostoucí teplotou se mění nejen pravidelná deformace, ale vzrůstají také nepravidelné změny a to dosti značně. Při 37°C, což odpovídá pracovní teplotě snímků při vyhodnocování na stereo-



Graf 4.

Závislost pravidelné deformace na teplotě.



Graf 5.

Závislost nepravidelné deformace na teplotě.

planigrafu, nabývá nepravidelná změna hodnoty přibližně 12 mikronů. S ohledem na teoretickou přesnost výškového vyhodnocení, která odpovídá měření horizontálních paralax se střední chybou 15 mikronů, je i tato zvýšená nepravidelná deformace ještě zanedbatelná. Při překreslování jsou požadavky na přesnost značně menší než při prostorovém vyhodnocování, takže v grafu uvedené hodnoty pro teplotu 47°C můžeme považovat rovněž za přípustné.

Podobná zkouška byla provedena s materiálem sušeným 14 dní kdy film se smrští na maximum a po 24 hod. se opět roztáhl do původní míry. Nepravidelná deformace byla obdobná hodnotě uvedené v grafu 5.

Závěr

Navrhovaný postup měření deformací fotogrammetrického materiálu byl vyzkoušen na VA AZ a může být plně doporučen.

Podle výsledků měření vykazuje zkoumaný materiál tyto změny:

pravidelná deformace: příčná 4,0 ‰, podélná 3,1 ‰;

rozdíl mezi příčnou a podélnou deformací: 0,9 ‰;

nepravidelná deformace: $\pm 8 \mu$.

V porovnání s údaji v moderní literatuře (viz. [1] str. 71) je pravidelná srážka větší, není však na závadu při fotogrammetrickém vyhodnocování, protože, jak již bylo uvedeno, se dá u universálních strojů eliminovat

odpovídající změnou vnitřní orientace vyhodnocovacích komor. Rozdíl pravidelné deformace mezi podélnou a příčnou $0,9 \text{ ‰}$ představuje při rozměru užitečného snímkového formátu maximální hodnotu přibližně $0,14 \text{ mm}$, což lze s ohledem na grafický způsob situačního vyhodnocování zanedbat. Změny vzájemné orientace a změny výškové dosáhnou relativní hodnoty $1/1000$ a jsou tedy naprosto bezvýznamné.

Nepravidelná deformace zahřátých snímků svou hodnotou 12 mikronů je nižší než přesnost, s jakou můžeme měřit na universálních strojích horizontální paralaxy a neprojeví se tedy při výškovém vyhodnocování. Pokud tedy bude film Aerorapid D vykazovat deformace pohybující se v uvedených mezích, je jeho použitelnost ve fotogrammetrii zajištěna.

Literatura:

- [1] Schwiddefelsky: Grundriss der Photogrammetrie, Stuttgart 1954.
- [2] Finsterwalder: Photogrammetrie, Berlin 1952.
- [3] Michajlov: Geodezija i kartografija 6-1957.

Využití elektrostatických a elektromagnetických sil pro fotoreprodukci a tisk

V poslední době se v polygrafických a populárně-vědeckých časopisech objevila mnohá pojednání o způsobech zhotovení tiskových desek a provedení tisku využitím elektrických a magnetických sil.

Proč se začali polygrafičtí praktikové a teoretikové těmito otázkami zabývat? Základní příčinou tohoto zaměření zahraniční polygrafie je to, že samotná příprava tisku všech způsobů zaujímá v průměru 25 % pracovní doby. Položí-li se dále proti sobě vysoce mechanizované způsoby a ruční a poměrně málo mechanizovaná příprava k tisku, je jasné, že snaha po využití a zavedení tzv. „bezpřípravného tisku“, jinak také bezkontaktního nebo beztlakového tisku, vyvolala široký ohlas a zájem. Tyto příčiny nakonec přispěly k tomu, že byla nalezena celá řada různých způsobů zmíněného tisku.

První zprávy jsou spojeny se jménem Wiliamse Heubnera, který se pokusy v tomto oboru zabýval od roku 1924, čímž byla otevřena cesta nové technice, použitelná v polygrafii.

Naše odborná literatura se uveřejněnými zprávami a zkušenostmi v tomto oboru až dosud celkem nezabývala. Je proto snahou přispět k objasnění problémů této nové reprodukční techniky, jako je:

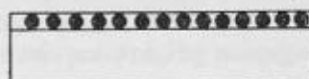
1. způsob „suchého“ fototisku,
2. způsob „xerografie“,
3. způsob elektrostatického tisku („onset“, „elektronografie“),
4. způsob ferromagnetického tisku,
5. způsob „elektrofax“.

Způsob „suchého“ fototisku

Princip způsobu „suchého“ fototisku spočívá v tom, že se na papír nanese polovodící fotografická vrstva (tzv. fotografický polovodič). Nad vrstvou fotografického polovodiče, např. kysličníku zinečnatého, je veden slabý elektrický drát, kterým protéká proud o vysokém napětí. „Koronným výbojem“ (tj. silným výbojem mezi vrstvou fotografického polovodiče a drátem), vzniká na fotografické polovodící vrstvě (viz obr. 1) jakoby „naprášený“ záporný elektrický náboj.

Na papír se pomocí objektivu zvětšovacího přístroje nebo jiného optického přístroje přenesou obraz originálu, který se má reprodukovat. Tmavá místa originálu nepropouštějí paprsky světla, vycházející ze zdro-

je, a proto odpovídající místa na papíře zůstanou neosvětlena. V těchto místech se náboje zachovávají. Světla místa originálu naopak propouštějí velké množství paprsků, které osvětlí odpovídající místa na papíře. V těchto místech se náboje částečně nebo úplně „ztrácejí“. Na fotografické polovodiví vrstvě se tedy vytvoří latentní elektrostatický obraz. Na tento obraz se naprašovacím zařízením nebo jiným způsobem nanáší „barva“ („vývojka“), která se skládá z prášku dielektrika, jehož každá částice je nabitá kladně (kladný náboj vzniká v částicích na základě



Obr. 1.

Náprášený elektrický náboj na fotografické polovodiví vrstvě.

tzv. triboelektrického efektu), a pryskyřice, která váže dielektrikum jako pojidlo. V těch místech, kde náboj není, lze prášek lehce odsát nebo oprášit s desky. Tímto způsobem se provádí „vyvolání“ elektrostatického obrazu. Jestliže se potom obraz zlehka zahřeje, pryskyřice, která je ve formě prášku, se roztaví a vytvořený obraz na podložce je pak dostatečně upevněn.

Jaké jsou přednosti nového způsobu ve srovnání se způsobem, při kterém se využívá obyčejných fotografických papírů? Papír s fotografickou polovodiví vrstvou stojí téměř tolik, kolik stojí obyčejný papír, tj. mnohem méně než fotografický papír. Nový papír nevyžaduje zvláštního uschování ani balení, ani nestárne.

Má-li se získat vícebarevný obraz, může se, jakmile je upevněna na povrchu zahříváním první barva, celý postup opakovat s barvou druhou.

Ukáže-li se, že obraz je nesprávný, lze jej po vyvolání (až do zahřátí) lehce odstranit pomocí zahřáté soli. Sůl se nasype v dostatečném množství na papír a papírem se zatřepe. Papíru je možno opět použít.

Kladnými vlastnostmi tohoto způsobu je to, že se vylučují „mokré procesy“ (vyvolávání, ustalování). Kromě toho se z pozitivu obdrží pozitiv bez zhotovení negativu, případně z negativu je možno získat negativ. Nakonec je nutné vyzvednout rychlost tohoto způsobu, (během vteřiny se získá hotový tisk se všemi detaily v jedné barvě).

Současným nedostatkem nového způsobu však je malá sytost a stálost obrazu, menší škála tónů ve srovnání se způsobem zhotovení obrazu na vrstvy halogenidů stříbra.

Malá sytost se odůvodňuje tím, že použité vývojky nevytvoří na desce takový povrch, který by po zahřátí dal dokonale sytý obraz. Uve-

dený nedostatek způsobuje také přenos šedých míst, čímž má obraz menší tónovou škálu.

Výše popsany způsob může se s úspěchem využít při fotomechanických procesech k získání negativů, diapositivů a masek, které se používají ke zhotovení tiskových desek (např. ofsetových i jiných v malých i středních formátech). V tomto případě se fotografická polovodící vrstva nanese na podložku, která může přijímat vodu. Výsledkem je tisková deska, na které netisknoucí místa vznikají na podložce a tisková místa vytváří prášek dielektrika.

Využití „suché“ fotografie při fotomechanických procesech

Dosud nejznámějším způsobem využití je způsob tzv. „xerografie“ („elektrofotografie“).

V literatuře se uvádí, že „xerografie“ byla objevena v roce 1938 Karlsonem, ale k tisku byla poprvé využita až v roce 1944 (v práci Langerova). Podle jiných pramenů byla „xerografie“ využita k reprodukčním účelům již na počátku 30. let tohoto století maďarským profesorem budapeštské university Pavlem Seleniem.

Způsob „xerografie“ nelze zařadit do kategorie mokrých procesů, protože probíhá bez účasti chemických reakcí. Užitím „xerografie“ se z pozitivního originálu získává pozitivní obraz.

„Xerografie“ z fotografického hlediska

Využití „xerografie“ pro fotografické účely je založeno na vytvoření elektrostatického latentního obrazu na fotografické vodící vrstvě, která je nanášena na izolačním materiálu. Za tím účelem se deska sensibiluje elektrostatickým nábojem. Takto sensibilovaná vrstva na izolačním materiálu se exponuje přes diapositiv. Působením dopadajícího světla na fotografickou vodící vrstvu shromáždí se elektrické náboje na to nebo ono místo v množství, které se zmenšuje úměrně intenzitě dopadajícího světla. Elektrostatický latentní obraz dává podobné shromáždění elektrických nábojů. Vyvolání se provede nanášením jemně rozmělněného prášku dielektrika. Dielektrikum se uchytlí jedině na elektricky nabitých místech úměrně velikosti náboje, který se na desce po expozici zachová.

Složení a způsob nanášení fotografické citlivé vrstvy

Fotografická citlivá vrstva se skládá s fotografické vodící látky nanášené na podložce. Jako fotografická vodící látka se může použít: selén, síra, antracén, antrachinon, roztavené směsi síry a selenu, síry

a antracénu použité v různých poměrech. Podložka, na které je nanesena fotografická polovodičí látka, nemusí s ní chemicky reagovat. Může se použít: papíru, plastických hmot a kovů. Při použití síry a antracénu používá se zinku nebo hliníku, ovšem stejně dobře může se použít mosazi.

Aby se zabezpečilo přilnutí fotografického polovodiče k podložce, provede se předběžné leptání desky. Jakékoli množství fotografického polovodiče se nanese na oleptanou desku a ta se zahřívá až do roztavení. Po ztuhnutí vrstvy se povrch vyleští.

Způsob nanesení vrstvy na desku z antracénu nebo antrachinonu je složitější pro lehkou sublimaci těchto druhů materiálů. V tomto případě se vedle tavení vrstvy používá vypařování ve vakuu.

Požadavky na použitý materiál

Pokusy a sledování elektrických vlastností fotografických polovodičích vrstev ukázaly, že má-li se na jejich povrchu zachovat elektrický náboj, musí být specifický odpor neosvětlené vrstvy řádu $10^{15} \Omega/\text{cm}$. Při osvětlení fotografické polovodičí vrstvy její specifický odpor musí být snížen až na velikost řádu 10^{10} – $10^{12} \Omega/\text{cm}$. Uvedených požadavků lze dosáhnout jedině v případě velmi čistých a jakostních fotografických polovodičů.

Jak již bylo uvedeno, jako vodící podložky pro xerografickou desku je možno úspěšně použít všech druhů papíru, skla, plastických hmot a kovů, ovšem v tom případě, nebude-li jejich specifický odpor vyšší než $10^{10} \Omega/\text{cm}$. Prakticky tady jde o využití elektrických izolátorů.

Postup při zhotovení desek způsobem „xerografie“

„Xerografický“ způsob reprodukce obrazu zahrnuje tyto operace:

1. přípravu podkladové desky,
2. sensibilisaci desky elektrostatickým nábojem,
3. expozici desky – vznik latentního elektrostatického obrazu,
4. vyvolání latentního elektrostatického obrazu dielektrikem,
5. přenos „práškovitého“ obrazu na papír nebo jiný materiál,
6. Upevnění obrazu.

Následující schéma ukazuje názorně postup zhotovení obrazu způsobem „xerografie“, což doslovně znamená „snadný tisk“.

Schéma pracovního postupu „xerografie“

1. Ve vysokém vakuu bude hliníková deska ovrstvena tvrdým selenem. Ionizačním zářením je elektricky nabit, aby byl fotograficky vodivý.

2. Povrch desky je kladně nabit, čímž získá citlivost vůči světlu asi jako citlivý film.
3. Originál bude reprodukován objektivem kamery na kladně nabitou desku. Ta místa desky, která byla osvětlena, „ztrácejí“ své kladné náboje.

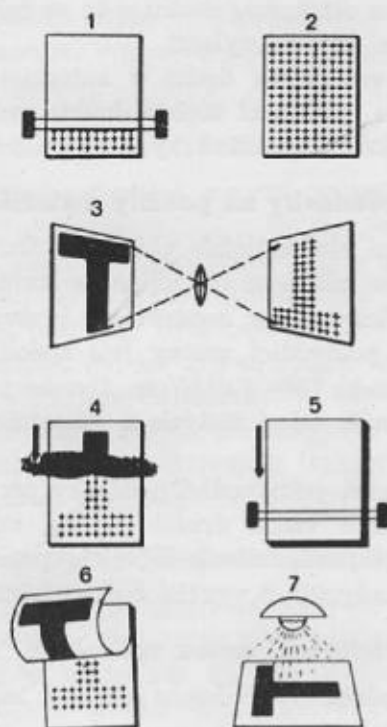


Schéma pracovního postupu „xerografie“.

4. Záporně nabitý barevný prášek s neutrálně barevným pojídlem bude nasypán a přitážen kladně nabitými částmi obrazu xerografické desky. Práškový obraz může být ještě korigován.
5. Po posypání práškem bude rovněž kladně nabitá papírová podložka (nebo jiná) položena na desku.
6. Prášek bude ke kladně nabitému papíru přitážen. Ke stranově obrácené pozitivní desce vznikne stranově správná reprodukce na papíře.
7. Krátkým zahřátím roztaví se termoplastická pryskyřice s práškem a pevně se tak spojí s papírem.

Ad 1. Příprava podkladové desky je založena na nanášení amorního selenu na kovovou destičku ve vysokém vakuu. Takto vytvořená odpařením vrstva selenu se chová stejně jako ve fotonce (fotobuňce).

Ad 2. Reprodukční zpracování „xerografické“ desky takto vytvořené začíná její sensibilisací, která spočívá v nabití fotografické citlivé vrstvy xerografické desky elektrostatickým nábojem, který bude působit pouze krátce. Sensibilisaci je možno provést jednoduše třením povrchu houbou nebo vlněnou látkou. Mnohem rychleji a lépe je možno desky sensibilisovat „koronovým“ výbojem. „Koronový“ výboj se získá obvykle pod napětím 4000–7000 V. Jako elektrody se využívají 1–3 tenké drátky o průměru cca 0,1 mm, které se upevňují přibližně ve vzdálenosti 1 cm od povrchu fotografické polovodičové vrstvy xerografické desky. Síla proudu má být 0,5 mA.

Zdrojem vysokého napětí může být elektrostatický generátor.

Množství elektrických nábojů, které na desce vznikají, stanoví se určením potenciálu povrchu této desky. Potenciál se určí změřením na galvanometru, který je spojen s etalonem, od něho je v určité vzdálenosti umístěna sensibilisovaná xerografická deska, která má být měřena.

Maximální velikost náboje, který se získá na povrchu xerografické desky při sensibilisaci, závisí na několika faktorech. Jedním takovým faktorem je doba sensibilisace desky.

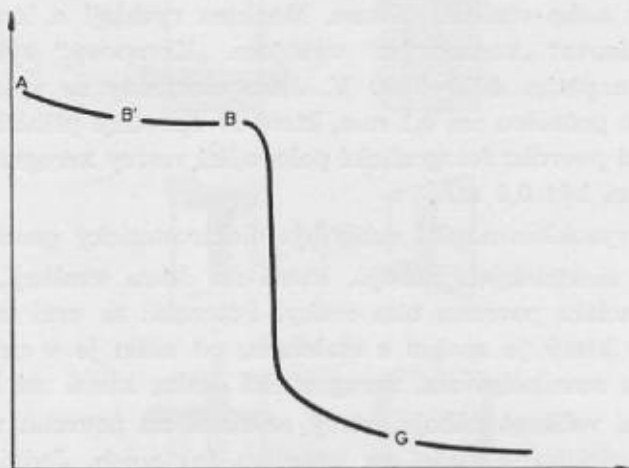
Sensibilisace xerografických desek provádí se potmě nebo při speciálním osvětlení. Desky se po použití mohou opět sensibilisovat a použít. Doba použití této desky je určena otíráním fotografické polovodičové vrstvy. V literatuře se uvádí, že nanesenou fotografickou polovodičovou vrstvou lze použít s dobrými výsledky až 500krát.

Citlivost nabitě desky se průměrně rovná podle literárních pramenů $\frac{1}{4}$ citlivosti fotografické vrstvy „KODAKCHROM“. Nabitou desku je možno chránit po dobu 24 hodin bez ztráty citlivosti. Selenová vrstva sensibilisací čili nabíjením získává kladný náboj.

Ad 3. Sensibilisovaná xerografická deska se může libovolně exponovat některým ze známých způsobů. Je jí možno umístit v obyčejné kasetě a exponovat ve fotoreprodukčním aparátě nebo provést expozici kontaktem přes diapositiv, který je k desce pevně přitlačen.

Expozicí se náboj zachová pouze na neosvětlených místech fotografického polovodiče. Náboj na osvětlených místech je odveden vodící podložkou do země.

Paprsek světla, dopadající na povrch fotografické polovodičí vrstvy ho učiní vodivým jen v bodě dopadu. Bylo dokázáno, že vzdálenost, na jakou kvantum světla vyvolává svůj účinek od bodu dopadu paprsku světla, je mnohem menší, než jakou je schopno rozlišit lidské oko. Tím způsobem vzniká ve vrstvě latentní elektrostatický obraz velmi blízko diapositivu, ze kterého se kopíruje. Je třeba dodat, že polotónové obrazy mohou být rozčleněny v okamžiku fotografování originálu. Tedy ve spo-



Obr. 2.
Změna potencionálu.

jení přímého fotografování textové nebo kreslené předlohy xerografický způsob značně zjednodušuje proces zhotovení půltónového obrazu na desce pro ofsetový tisk. Tónové kopie získané až dosud xerografickými prostředky vykazují menší tónový rozsah.

K jakým změnám dochází během sensibilisace a expozice, ukazuje obrázek 2. Je na něm ukázána změna potenciálu xerografické desky během sensibilisace a expozice.

Při sensibilisaci desky se deska nabije do určitého počátečního potenciálu A.

Laboratorní zkoušky ukázaly, že potmě dochází k poklesu potenciálu (úsek AB). Bod B odpovídá počátku expozice desky. Potenciál těch míst fotografických polovodičích povrchů, na které dopadají paprsky světla, je velmi bezvýznamný, pokud náboje v těchto místech podložkou odcházejí. Potenciál se zmenšuje s intenzitou světla dopadajícího na danou část fotografické vodivé vrstvy, avšak lineární závislost mezi nimi nevzniká. V bodě G potenciál dosáhl minimální hodnoty. Takto se potenciál

latentního elektrostatického obrazu mění na jednotlivých místech od hodnoty blízké nule do nějaké maximální hodnoty. Na základě toho je dána možnost reprodukce všech tónů daného originálu.

Latentní elektrostatický obraz se může zachovat na desce bez poškození po dobu 24 hodin, uchová-li se v prostředí, které nepůsobí na elektrostatický náboj.

Ad 4. Vyvolání se provádí bez kapalin, za sucha. Latentní elektrostatický obraz může být vyvolán „vývojkou“, která má elektrický náboj opačný, než je náboj latentního obrazu. Skládá se ze směsi dvou komponentů: velmi jemného tónovacího prášku a hrubozrnného prášku „svazujícího“. Jako prvního komponentu se používá pigmentového prášku pryskyřice, jehož postavení v triboelektrické řadě zaručuje vytvoření dostatečně silného záporného náboje při tření jemného prášku se zrnky prášku „svazujícího“. Prášek musí být dobře tavitelný při teplotě, která nezpůsobuje poškození papíru. Hrubozrnné „pojídlo“ se vybírá takové, aby získání velkého kladného náboje bylo zaručeno a odpovídalo postavení „pojídla“ v triboelektrické řadě.

Podle názoru některých badatelů bylo na základě experimentů odvozeno, že velikost jednotlivých zrn musí být průměrně 0,2–20 mikronů.

Jako „vývojky“ se může použít prášku z kopálové pryskyřice, pečetiho vosku, asfaltu, kalafuny a jiných různých syntetických nebo přírodních pryskyřic. Zkoušky byly provedeny také s uhelným práškem, mastkovou křídou, suříkem a jinými kovovými prášky.

Nanesením některého z uvedených prášků, prášek přilne k místnímu náboji. V místech, kde fotografická vodící vrstva bude necitlivá ke světlu, vyvolávací prášek se odrazí.

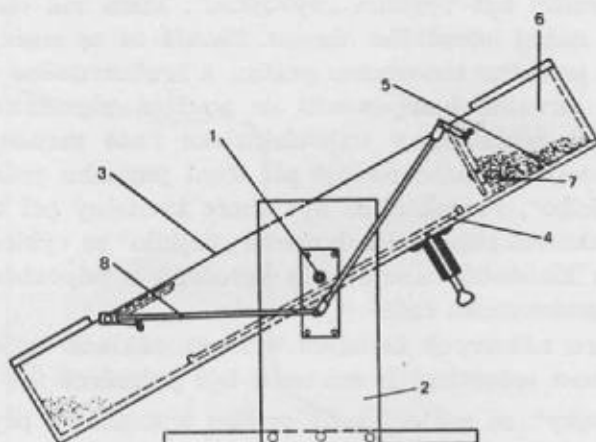
Vyvolaný obraz je positivem, který je nečitelný.

Pro vyvolání se v literárních pramenech uvádí mnoho jednoduchých konstrukcí vyvolávacích zařízení. Jedno z nich je znázorněno na obrázku 3.

Zařízení samo o sobě představuje výkyvnou osu 1, která je upevněna na sloupku 2 ploché skříň 3. Skříň je opatřena záchytkami pro umístění xerografické desky 4. Vyvolávací prášek 5 je v nádržce 6, která je oddělena od skříňky zdvihadí klapkou. Velikost otvoru mezi skříňkou (dnem) a klapkou může být podle potřeby změněna. Tato velikost je určena množstvím prášku, který dopadá na desku. Klapka skříňky zdvihadí se činností táhla 8, které je umístěno v prázdné části skříňky.

Ad 5. Vyvoláním obrazu obdrží se hotová tisková deska, ze které se může obyčejným kontaktním způsobem získat určité množství obtisků.

Na desku se proto položí list papíru, který obsahuje elektrický náboj shodný s elektrickým nábojem fotografické polovodičové vrstvy. Obtisky se mohou zhotovit na jakýkoli materiál, na kterém se nyní získá čitelný pozitivní obraz. Takto získaný přímý obraz může se v tomto stavu korigovat a lze na něm provést jakékoli potřebné vymazávky pomocí speciální vymazávací gumy nebo provést doplňky perem.



Obr. 3.
Schéma vyvolávacího zařízení.

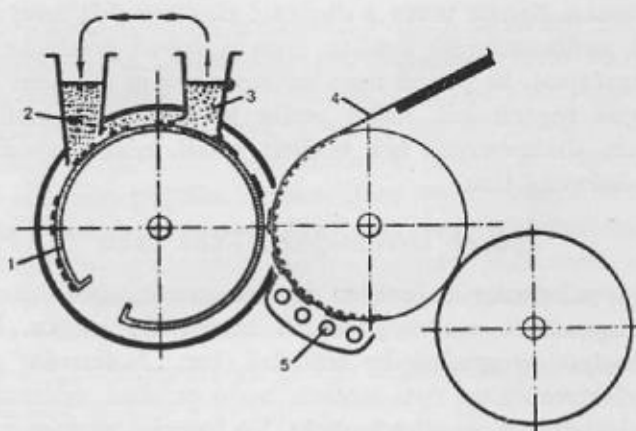
Ad 6. Materiál přiložený na zhotovenou xerografickou desku se pouští přes speciální elektrický přístroj, kdy obraz přechází na povrch přiloženého materiálu (ad 5). Získaný obraz na přiloženém materiálu se upevní na jeho povrchu zahříváním.

Uvedený způsob obtahů xerografické desky se nezabýval upevněním zhotoveného obrazu přímo na desce, ze které se obraz snímá na přiložený materiál. V literatuře je uváděna životnost takovéto desky asi na 750 až 1000 obtisků. Ustálený práškový obraz na xerografické desce dává možnost zhotovit až 20 000 výtisků.

Důkazem použitelnosti uvedeného způsobu v polygrafii a reprodukcii map jsou výsledky uváděné v zahraniční literatuře: na příklad v USA byly zhotoveny desky tímto způsobem a využity pro tisk nákladu o 2 až 5 tisících tisků. Nejnovější zprávy uvádějí, že speciálním zpracováním vynikají xerografické desky vysokou tiskuschopností. Zprávy udávají, že pro vojenskotopografické účely jde až o 100 000 náklady.

Způsob elektrostatického tisku

Při elektrostatickém tisku je postup zhotovení tiskových desek stejný jako při suché fotografii, avšak jako tiskové desky se používá tzv. fotoelektrikum, které představuje fotografickou polovodičí vrstvu, jejíž vnitřní elektrická polarita je dlouho zachovatelná. Potom latentní obraz naexponovaný s originálu na fotografickou polovodičí vrstvu má tu vlastnost, že se na ní udrží dlouhou dobu.



Obr. 4.
Schéma stroje pro elektrostatický tisk.

V literatuře a odborných kruzích je způsob elektrostatického tisku znám pod názvem „onset“ nebo „elektronografia“.

Jestliže se výše popsaným způsobem zhotoví tisková deska a vloží do speciálního stroje (obr. 4), bude průběh tisku tento:

Deska (1) prochází pod „barevníkovým“ zařízením (2), kde se na desku nanáší „barva“, která je ve formě prášku a skládá se ze směsi dvou komponentů: velmi drobného tónovacího prášku a hrubozrnného „svazujícího“. Deska dále prochází pod stíračem, kde se všechen prášek, který se neudrží na desce pomocí elektrostatického náboje, odstraní. „Barva“ zůstane pouze v těch místech desky, které odpovídají prvkům obrazu! V tomto okamžiku deska přichází do styku s papírem (4), který má záporný náboj silnější, než je náboj desky. „Barva“ tak přechází z desky na papír a uchytlí se na něm. Tímto způsobem dochází k procesu tisku, ovšem nikoli působením tlaku, ale působením elektrostatických sil. Deska zbavená „barvy“ prochází znovu pod „barevníkovým“ zařízením. Papír s „práškovým obrazem“ prochází přes zahřívací zařízení (5), při čemž

se pryskyřice obsažená v prášku roztaví a obraz se na povrchu papíru upevní. Zhotovený tisk je tak připraven k jakémukoli použití.

Předností tohoto způsobu jsou lacinější zhotovené desky, které jsou vysoce tiskuschopné, laciné „barvy“ a samotný proces tisku. Odstranění tlaku při tisku dává reálné možnosti ke zjednodušení konstrukce tiskařských „strojů“ a omezení jejich váhy. To zároveň dává předpoklady ke zvyšování rychlosti tisku na uvedených strojích. Ovšem proti uvedeným kladům je třeba uvést také nedostatky tohoto způsobu. Srovnáme-li jakost tisku, sytost a čistotu textu a ilustrací zhotovených novým způsobem, vidíme, že se nedosahuje té kvality jako u dosud používaných způsobů tisku. Je samozřejmé, že pokud není známo chování a jakost použití tisku při vícebarevné reprodukci, nelze podle jednotlivých tisků nebo tisků dvoubarevných, zhotovených bez větších potíží, reálně zhodnotit způsob tisku pro vícebarevný tisk.

Způsob ferromagnetického tisku

Pro zhotovení desky způsobem ferromagnetického tisku se využívá stejná ferromagnetická vrstva jako při zapisování zvuku. Použije-li se metody a principu fotografického snímání (tzv. „řádkování“), kterého se využívá při elektronickém rytí štočků, bude použité zařízení zachycovat na vrstvě neviditelný magnetický obraz. Ve fotoelektrickém zařízení vznikají při „řádkování“ fotografické proudy (fotoproudy“) různé intenzity. Tyto „fotoproudy“ jsou úměrné tónovitosti reprodukováného obrazu. Vzniklé „fotoproudy“ uvádí v činnost elektromagnetický systém, který indukuje na vrstvě magnetické pole, jehož intenzita je úměrná impulsům elektromagnetického pole. Takto se získá hotová deska, která je na světlo necitlivá. Jestliže se na tuto desku nanese prášek z kysličníku železnatého nebo jiného ferromagnetického materiálu a pryskyřice, je potom udržen jen místy, které si zachovaly náboj. Na jiných místech se neudrží. Přenos obrazu na papír, tj. „tisk“, může se provést buď kontaktním způsobem nebo pomocí magnetického pole, které svým magnetickým účinkem vytvoří na papíře „práškový“ obraz, nacházející se na desce.

Jinak je celý proces podobný jako u elektrostatického způsobu. Rozdíl spočívá v tom, že při elektrostatickém způsobu jsou sice levnější desky, musí se však chránit před působením světla, poněvadž jsou citlivé na světlo, kdežto při ferromagnetickém tisku jsou desky na světlo necitlivé.

V současné době není ještě možno říci, který z těchto způsobů nalezneme širší využití. Dokonalé rozhodnutí o využití některého z uvedených způsobů přinesou další výzkumné práce, které budou v blízké budoucnosti prováděny.

Způsob „Elektrofax“

Zabývá se způsobem bezkontaktního kopírování. Fotograficky citlivým elementem v uváděném způsobu je fotograficky vodivý prášek a pryskyřice, která slouží jako pojídlo. Tato směs může se snadno nanést na jakýkoliv podklad: papír, umělou hmotu nebo kovovou folii. Uvedená směs nanesená jako ovrstvení na tyto materiály není ke světlu citlivá. Získá však dobré fotografické vlastnosti, jestliže se povrchu dodá elektrický náboj.

Aby takový systém našel praktické využití, musí být fotografický vodič levný, nejedovatý a jednoduchý pro zacházení. Bylo konstatováno, že těmto požadavkům odpovídá zvláštní druh kysličníku zinečnatého. Zahraniční literatura uvádí, že bylo použito vrstev „Elektrofax“, které se skládají ze směsi kysličníku zinečnatého a nedeficitní speciální pryskyřice, která slouží jako pojídlo. Nanese-li se vrstva tohoto složení na obyčejnou, slabou a průhlednou podložku papíru pro elektrofotografický tisk, bude se lišit od fotografických papírů, jejichž vlastnosti určují vrstvy halogenidů stříbra tím, že je stálejší, lépe se skladuje a je necitlivá ke světlu, není-li nabita elektrickým nábojem.

Uváděný elektrofotografický proces kopírovací pod názvem „Elektrofax“ se v základě skládá z těchto operací:

1. Rovnoměrné elektrostatické nabití povrchu, pokrytého směsí prášku fotografického vodiče a pryskyřice, buď ve tmě nebo s příslušným ochranným osvětlením. Pro nabíjení může být použito uzemněného náboje ze svazku tenkých drátků spojených se záporným pólem generátoru jedno-směrného proudu napětí 4–7 kW. Podložka pro elektrofotografickou vrstvu musí být spojena s kladným pólem uvedeného zdroje.

2. *Provedení expozice na zcitlivěný povrch.* Jestliže se konečný obraz zhotovuje způsobem „positiv-positiv“, je možno odražený obraz pérového nebo tónového originálu exponovat prostřednictvím příslušné optiky. Při expozici dochází na fotograficky vodivém povrchu k vybití v poměru k intenzitě světla, které dopadá na danou část povrchu a zanechává tak na něm latentní elektrostatický obraz, který odpovídá rozdělení tónů na originálu.

3. *Vyvolání latentního elektrostatického obrazu* se provádí pomocí prášku z vhodného, kladně nabitého materiálu. V literárních pramenech se uvádí, že jako „vývojky“ je možno použít prášku termoplastické pigmentové pryskyřice. Prášek se připravuje se zřetelem na to, aby na něm při jeho smíšení nebo rozetření se železnými pilinami vznikaly silné kladné statické náboje. Vyvolání latentního obrazu metodou „Elektrofax“ se pro-

vádí tak, že se povrch, na kterém je záporně nabitý latentní obraz, pokryje kladně nabitým „magnetickým štětcem“, který tvoří směs velkého množství železných pilin a vyvolávacího prášku („vývojky“). Směs je přitahována polem použitého stálého magnetu. Vzájemné střetnutí a tření částic železa a „vývojky“ vede k tomu, že povrch částic železa se nabíjí záporně a částice „vývojky“ kladně. Působením přitažlivosti ze strany záporných elektrostatických nábojů se částice „vývojky“ oddělují od částic železného prášku a pokrývají příslušné části obrazu.

4. *Ustalování vyvolávaného obrazu.* Po vyvolání se obraz vytvořený práškem termoplastické pryskyřice ustaluje tím způsobem, že se na povrchu podložky s fotografickou polovodičí vrstvou kysličníku zinečnatého pryskyřice rozeheje. Ustalování lze provádět na světle, neboť elektrostatické přitažení bude po určitou dobu udržovat práškový obraz na místě bez doplňující elektrisace. Lze také použít i jiné způsoby: opracování pod tlakem nebo zpracování obrazu parami rozpouštědla. Uvedené způsoby ustalování obrazu závisí na druhu použité „vývojky“.

Po třetí operaci může být obraz v případě potřeby setřen tak, že se osvětlí světlem z jednoho zdroje, při čemž vyvolaný obraz se vybíjí a pomocí „magnetického štětce“ se odstraní s fotograficky citlivého povrchu. Je nutno dodat, že v důsledku toho, že elektrostatické náboje a ustalovací procesy nahřívací nemají na vrstvu „Elektrofax“ trvalého účinku, je možno kdykoli získat doplňující kopii tak, že se jednoduše opakují výše uvedené čtyři základní operace.

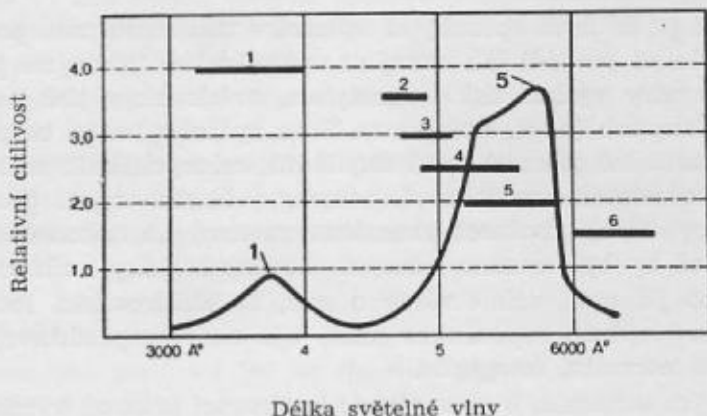
Jaké jsou možnosti barevné sensibilisace vrstev „Elektrofax“

Vrstvy typu „Elektrofax“ je možno podrobit barevné sensibilisaci. Používaný kysličník zinečnatý má největší citlivost na ultrafialové a temněmodré části spektra, ale jeho citlivost na viditelnou část spektra lze rozšířit zavedením obvyklých sensibilisátorů. Bylo dokázáno, že kysličník zinečnatý je schopen absorpce nejrůznějších látek (např.: akridin, fluorescein, eosin, bengalrossa, methylenová modř ap.), čímž se získá dostatečně dobrá citlivost k energii světelných vln. Absorbované sensibilizační látky rozšiřující tak rozsah spektrální citlivosti.

Různé druhy sensibilisátorů a rozsah jejich spektrální citlivosti je uveden na obr. 5. Uvedená křivka ukazuje citlivost kysličníku zinečnatého (1) a jeho citlivost po sensibilisaci pomocí „bengalrossy“ (5).

Citlivost vrstev „Elektrofax“ leží v mezích citlivosti obvyklých fotografických vrstev, ovšem doba expozice je $1000\times$ menší (jinak řečeno rychlost expozice je $1000\times$ větší) než při obyčejných vrstvách chromovaných klovatin.

Pro srovnání jsou uvedeny některé expoziční doby na nesensibilisované vrstvy „Elektrofax“. Při použití dvou 4W fluorescenčních lamp bílého světla volí se podle zkušeností amerických polygrafických odborníků 1–2 vteřiny, přičemž originál byl vzdálen od zdroje světla 50 cm. Použitím fluorescenčních lamp s ultrafialovým světlem (2 lampy à 4 UT),



Obr. 5.

Spektrální citlivost vrstev „elektrofax“ – Zn O (1), sensibilovaného různými barvivy: – akridin (2)
 – fluorescein (3)
 – eosin (4)
 – bengalrossa (5)
 – methylenová modř (6)

křivka označuje relativní citlivost nesensibilovaného Zn O (1) a sensibilovaného barvivem „bengalrossa“ (5).

tn. světlem, které vysílá paprsky té části spektra, ve které je kysličník zinečnatý nejcitlivější, expozice byla $\frac{1}{10}$ vteřiny.

Jak se změní doba expozice, ukazuje příklad, že při použití orthochromatického barviva je doba expozice $30\times$ delší než u nesensibilisovaných vrstev.

Možnosti používání procesu „Elektrofax“ v polygrafii

Nízká cena vrstvy „Elektrofax“ společně s dobrým přizpůsobením k mnohým široce rozšířeným způsobům nanášení vrstev, jako je nanášení v odstředivém bubnu, máčení, natírání pomocí štětky nebo válečku, skýtá široké možnosti používání vrstvy „Elektrofax“ v polygrafii, a to v těch oblastech, kde je třeba odstranit „mokrý“ procesy

a využít krátké expozice. Uvedené vrstvy „Elektrofax“ mají ještě celou řadu velkých předností, jako na příklad stálost vlastností při skladování, necitlivost ke světlu nebo záření ve stavu, kdy nejsou nabité. Obraz je možno setřít nebo podrobit doplňujícím kopírování. Vykopírovaný obraz je chemicky stálý v normálních prostředích a stabilní při obvyklých skladovacích podmínkách.

Nesporné je, že nové způsoby se uplatní v takovém druhu produkce, která se až dosud provádí tak zvanými operativními tiskovými procesy, a do značné míry vytlačí tisk cyklostylem, světlotisk a tisk na maloformátových strojích (např. Rotaprint). Nové způsoby budou bezpochyby také nepostradatelné při získávání duplikátů vzácných knih nebo knih, kterých je nedostatek, rozmnožování osnov a ilustrovaných přednášek. Nové principy dávají možnost zkonstruovat stroj „s nekonečnou deskou“, na němž by bylo možno tisknout všechny stránky knih současně.

Je možno již nyní učinit závěr o tom, že elektrostická fotografie, jak tento nový způsob reprodukce může být nazván, představuje obohacení oblasti normální fotografie.

Nezbytným zařízením k procesům je kopírovací přístroj, výrobní souprava a zařízení pro stmelování prášku. V současné době je v zahraničí věnována pozornost hlavně oboru maloformátových ofsetových strojů. Zařízení které se vyrábí v Anglii a je určeno pro tento proces zhotovování tiskových destiček pro maloformátové ofsetové stroje, bude použito pro maximální rozměr destičky 13×8,5 palce. Přístroje se vyrábějí dvojího druhu: přístroj Xerox SS pro kontaktní kopírování a přístroj Xerox VR, kterým lze provádět zmenšení až o 50 % a zvětšení až o 150 %. Oba tyto přístroje jsou vybaveny automatickým expozičním zařízením (expoziční hodiny).

K pracovní soupravě náleží nabíjecí hlavice, zásuvka na posypávání desek pro vyvolávání a jejich čištění a skladová přihrádka na desky xerografické a tiskové. Vyrábějí se dva typy zařízení pro stmelování prášku: normální výhřevná souprava pro upevňování prášku na papíru nebo na kovu a výparové stmelovací zařízení pro používání celulosních filmů, kde nemůže být použito tepla.

Způsob „xerografie“ skýtá řadu výhod, které jsou prospěšné zvláště při tisku. Jde o suchý proces, který nevyžaduje chemických roztoků a nepřináší ztrátu času sušením desek. Proces je nenákladný. Jen vyvolávací prášek je v procesu dražším prvkem.

Přesto, že se v odborných polygrafických časopisech objevilo z tohoto oboru mnoho článků, není možné učinit si opravdovou představu o těchto nových způsobech kopírování a tisku. Veškeré dojmy po pro-

studování uveřejněných zpráv jsou čistě teoretické, poněvadž není možno si je ověřit. Některá zpráva popisuje uvedené způsoby jako opravdu vynikající, jiná naopak připouští možnosti některých nedostatků, jako na příklad malou sytost nebo nečistotu zhotovených tisků. Z hlediska velkých rychlostí, které jsou podle literárních pramenů někdy přímo fantastické, by bylo využití těchto nových způsobů v topografické službě pro rychlé rozmnožování bojových dokumentů přímo ideální, ovšem uvedené nedostatky by byly na závadu.

Možnosti využití v kartoreprodukci jsou zatím omezené, poněvadž prostředky, které jsou pro výzkum v tomto oboru k dispozici, jsou velmi malé. Práci je třeba zaměřit na sledování zahraničních zpráv, využít výsledků výzkumů elektrotechniky ve výrobě fotografických polovodičů a jejich zcitlivování elektrickým proudem a dále využít výsledků chemických laboratoří pro vývoj pryskyřic a vyvolávacích prášků.

Literatura:

1. Patent USA No 1 818 760. On the Electrographic Recording of fast electrical phenomena.
2. Patent VB No 672 767. Electrophotography.
3. Patent VB No 679 715. Method and Material for making Powder Images Electrically.
4. Chemical and Engineering News, Nowember 1, No 44., 1948, 26. New Photo Reproduction Process Shown Battelle Institute, str. 3264-5.
5. Patent USA, No 2 693 416. Method of Electrostatic electrophotography.
6. The National Lithographer, July 1955. 7th Annual Meeting of TAGA Reviewed, str. 46-7.
7. Product Enginnering, December XII., 19, 1948. Dry Printing Process Operater Electrostatically, str. 132.
8. Electrical Enginnering, January I., 1949, 68. Xerography, a Printing Process.
9. Journal of Scientific Instruments, No 2., 1955, 32. Ligid developers for xerography, str. 74-5.
10. Mechanical Engineering, No II., 1949, 71. Xerography.
11. The British Printer, No 6., 1956. Progress Report on a New Photosensitive material, str. 22-25.
12. The British Printer, No 6., 1957. First British Equipement is Now Available for Xerographic Techniques, str. 38-40.
13. Modern Lithography, No 2., 1956. Planographic Printing Process, str. 123.
14. The National Lithographer, No 10., 1954. Producing photographs electrically, str. 128.
15. Printing Equipement Engineering, No 6., 1955. Xerography Usable in Fluid Type Duplicating, str. 71, 114.
16. Der Druckspiegel, No 5., 1957. Xerografie, ein elektrofotographischen Druck- und Trokenkopierenverfahren, str. 275-283.
17. Poligrafičeskoje proizvodstvo, No 1., 1955. Pečatánie s elektrostatičeskim pereznosom krasočnovo sloja, str. 34-38.

18. Poligrafičeskoje proizvodstvo, No 1., 1956. Fysikální základy bezkontaktního kopírování.
 19. Poligrafičeskoje proizvodstvo, No 5., 1957. Zhotovování obrazu pomocí elektrických a magnetických sil, str. 5–8.
 20. Poligrafičeskoje proizvodstvo za rubežom, No 2., 1957. Zhotovování tiskových desek pro ofsetový tisk xerografickým způsobem, str. 38–40.
 21. Poligrafičeskoje proizvodstvo za rubežom, No 2., 1956. Elektrofax, způsob bezkontaktního kopírování, str. 33–42.
 22. Poligrafičeskoje proizvodstvo za rubežom, No 2., 1957. Zdokonalení xerografie, str. 36–38.
 23. Poligrafičeskoje proizvodstvo za rubežom, No 2., 1957. Xerografický způsob zhotovování tiskových obrazů, str. 30–36.
 24. Poligrafičeskoje proizvodstvo za rubežom, No 4., 1957. Xerografie, str. 6.
 25. Poligrafičeskoje proizvodstvo za rubežom, No 2., 1957. Používání xerografie pro tisk malých nákladů, str. 41.
 26. Poligrafičeskoje proizvodstvo, No 4., 1956. Využití xerografie v polygrafii, str. 28.
-

O B S A H

| | |
|--|----|
| Inž. plk. prof. Ing. Dr Josef Vykutíl, VA AZ: Tíhové korekce geometrické nivelace a „normální“ výšky v Baltském systému | 1 |
| Ing. Zdeněk Nevosad, VA AZ: Theoretické základy měření délek elektromagnetickými vlnami | 25 |
| L. M. Avdějev — překlad: Radiolokační zabezpečení podkladu pro fotogrammetrické mapování | 65 |
| Inž. mjr. Ing. Vladimír Saga: Plocha ČSR | 73 |
| Otto Dorčák, laborant VA AZ: Zjišťování deformace leteckého filmu | 83 |
| Ing. Jaromír Ježek: Využití elektrostatických a elektromagnetických sil pro fotoreprodukci a tisk | 94 |

VOJENSKÝ TOPOGRAFICKÝ OBZOR. Vydává MNO. Redakční rada: Ing. Dr Jan Klíma (předseda), Ing. Jaromír Bátěk, doc. Ing. Dr Bedřich Chrastil, Ing. Miloš Jelínek, Ing. Josef Jeník, Dr Jiří Kousal, prof. Ing. Dr Josef Vykutíl (členové). Redaktor Ing. Otakar Skoupý. Předplatné 4,- Kčs ročně. Časopis si mohou předplatit vojenské osoby z povolání a žáci vojenských učilišť. Tiskne VZÚ Praha.