

SODAR - NOVÝ PROSTŘEDEK SONDÁŽE MEZNÍ VRSTVY OVZDUŠÍ

«*Sodar — новое средство зондирования пограничного слоя атмосферы.*» В статье дается описание основной теории, принципа и приложения нового метода наблюдений — акустического зондирования.

“*Sodar — a new means of sounding of the atmospheric boundary layer*”. The basic theory, principle and application of the new observation method — acoustic sounding — are described in this article.

ÚVOD

Určitým paradoxem moderní technické civilizace je skutečnost, že čím složitější a mocnější prostředky má k dispozici, tím se stává citlivější na vlivy atmosférického prostředí, tím více se komplikuje její vzájemná interakce s ním. To se projevuje v rostoucí potřebě informací o stavu atmosféry a prognózy jejího vývoje pro nejrůznější účely — dopravu, energetiku, spoje, a v neposlední řadě, účely ochrany životního prostředí.

Klasický meteorologický pozorovací systém, založený na síti synoptických, klimatických a radiosondážních stanic vyhovuje pro sledování procesů synoptických měřítek, tj. prostorově řádově 10^3 km a časově 1–2 dny. Současná potřeby společnosti si však vynucují obrovské prostorové a časové zhuštění meteorologické informace, v prostorových měřítkách 1–100 km a pro časové periody maximálně 6–12 hodin.

Je nemyslitelné, že by tohoto zhuštění bylo možné dosáhnout pomocí klasických pozorovacích metod.

Ukazuje se, že vyhovět těmto požadavkům mohou pozorovací metody, nazývané v americké literatuře Remote Sensing Methods. Jelikož prozatím nemáme pro tyto metody vhodný souhrnný název, budeme v dalším používat termín RS-metody s tím, že se

jedná o pozorovací a měřicí metody vyznačené následujícími vlastnostmi:

- RS-metody jsou založeny na interakci akustických a elektromagnetických vln se sledovaným prostředím. Může se jednat o vlny přirozeného původu (pasivní metody) nebo o vlny uměle vyvolané (aktivní metody). Používá se celé šíře spektra vlnových délek, od infra- do ultra- oborů;
- čidlo měřicího přístroje není umístěno v tom bodě prostoru, kde měříme parametry prostředí. Přijímací část přístroje a sledovaná oblast mohou být vzdáleny i stovky kilometrů.

Mezi přístroje pracující na principu RS-metod patří tedy, ve smyslu výše uvedeného, např. radiolokátory, laserové lokátory, radiometry apod. Naopak mezi ně nepatří např. radiosonda nebo telemetrické měřicí systémy.

V dalším věnujeme pozornost jedné z nadějně se rozvíjejících RS-metod, a sice sondáži atmosféry pomocí akustických vln v oboru slyšitelných frekvencí. Přístroj pracující na tomto principu se v literatuře nazývá akustický radar, acdar (*Acoustic Detecting and Ranging*) nebo sodar (*Sound Detecting and Ranging*).

ROZPTYL AKUSTICKÝCH VLN V TURBULENTNÍ ATMOSFÉŘE

Akustické vlny šířící se atmosférou jsou rozptylovány turbulentními fluktuacemi teploty vzduchu a rychlosti větru. V homogenním a spojitým prostředí se akustické vlny nerozptylují. K jejich rozptylu je nutná existence nehomogenit v indexu lomu prostředí, tj. nehomogenity v rychlosti šíření vln. Rychlost šíření akustických vln v atmosféře je funkcí teploty vzduchu a rychlosti větru. Turbulentní fluktuace těchto prvků jsou tedy příčinou rozptylu akustických vln šířících se turbulentním prostředím.

Předpokládáme-li Kolmogorovo spektrum turbulence, platí (Little, 1969)

$$\sigma(\vartheta) = 0,055\lambda^{-\frac{1}{3}} \cos^2 \vartheta \left[\frac{C_V^2}{c^2} \cos^2 \frac{\vartheta}{2} + 0,13 \frac{C_T^2}{T^2} \right] \cdot \left(\sin \frac{\vartheta}{2} \right)^{\frac{11}{3}} \quad (1)$$

Zde $\sigma(\vartheta)$ je poměr toku akustického výkonu rozptýleného jednotkovým objemem do jednotkového prostorového úhlu (ve směru ϑ) k toku akustického výkonu na rozptylující objem dopadajícímu, ϑ je rozptylový úhel (měřený od směru dopadající vlny), λ je vlnová délka zvukové vlny pro průměrnou teplotu rozptylujícího objemu T , c je průměrná rychlost zvuku. Strukturální parametry rychlosti větru a teploty vzduchu C_V^2 a C_T^2 jsou definovány takto

$$C_V^2 = \left[\frac{u(x) - u(x+r)}{r^{\frac{1}{2}}} \right]^2$$

$$C_T^2 = \left[\frac{T(x) - T(x+r)}{r^{\frac{1}{2}}} \right]^2$$

Osa x je orientována ve směru vysílané vlny, $u(x)$, $u(x+r)$ jsou okamžité hodnoty rychlosti větru ve směru osy x , r se měří ve směru osy x . Podobně $T(x)$, $T(x+r)$ jsou okamžité hodnoty teploty v bodech x , $x+r$.

Z rovnice pro $\sigma(\vartheta)$ vyplývá:

1. za předpokladu Kolmogorovova spektra turbulence závisí rozptýlený výkon poměrně málo na vlnové délce dopadající vlny;
2. výsledný rozptyl je součtem dvou příspěvků — rozptylu způsobeného fluktuacemi rychlosti větru (první člen v závorce) a rozptylu způsobeného teplotními fluktuacemi (druhý člen);
3. ve směru kolmém na směr šíření dopadající vlny ($\vartheta = 90^\circ$) nenastává žádný rozptyl;
4. fluktuace rychlosti nevyvolávají zpětný rozptyl ($\vartheta = 180^\circ$);
5. největší rozptyl pro rychlostní i teplotní složku je ve směru šíření dopadající vlny ($\vartheta = 0^\circ$).

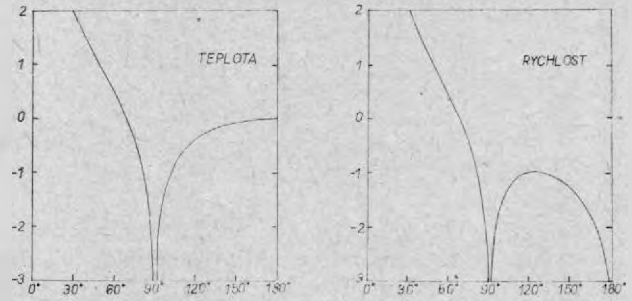
Závislost velikosti rozptylu na rozptylovém úhlu ukazuje obr. 1.

Rozbor rovnice (1) naznačuje potenciální možnosti akustické sondáže atmosféry. Měření rozptýleného akustického výkonu jako funkce rozptylového úhlu, jeho výškové a časové profily mohou poskytnout dosud neznámé informace o atmosférické turbulenci, podmínkách atmosférické difúze a rozptylu příměsí.

V současné době nejvíce užívaným a komerčně vyráběným je tzv. monostatický akustický lokátor. Zdroj signálu a přijímač rozptýleného signálu jsou v tomto případě umístěny v téže bodě. Přijímá se tedy akustický výkon rozptýlený zpět k přijímači, do úhlu $\vartheta = 180^\circ$. Z rovnice (1) plyne

$$\sigma_{(180)} = 0,0072\lambda^{-\frac{1}{3}} \frac{C_T^2}{T^2} \quad (2)$$

Budeme v dalším označovat $\sigma_{(180)}$ jako σ a nazývat efektivní průřez zpětného rozptylu.



Obr. 1. Závislost rozptylu na rozptylovém úhlu (v logarítmích poměrných jednotek)

Pro vztah mezi vyzářeným akustickým výkonem P_t a výkonem P_r přijatým přijímačem platí v případě monostatického systému výraz analogický tzv. radarové rovnici pro elektromagnetické vlny (Little, 1969).

$$P_r = \frac{P_t \sigma c \tau A_e}{2R^2} L \quad (3)$$

Zde c je rychlost zvuku v rozptylujícím prostředí, τ časová délka vysílaného pulsu, A_e efektivní průřez přijímači antény, R vzdálenost rozptylujícího objemu od vysílače a L koeficient vyjadřující útlum zvukové vlny absorpcí a ztráty v přijímacím traktu zařízení.

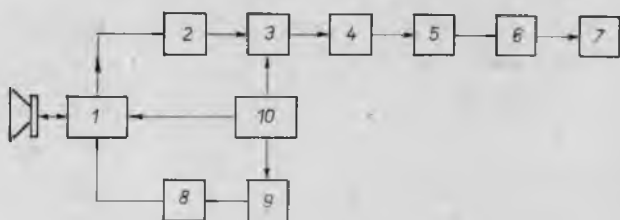
Změříme-li přijatý výkon P_r a známe-li ostatní parametry v rovnici (3), můžeme určit σ . Jak vyplývá z rovnice (2), pro monostatický systém je σ závislé pouze na strukturálním parametru teplotních fluktuací C_T . Fluktuace rychlosti větru ke zpětnému rozptylu nepřispívají. Monostatický systém tedy např. umožňuje, při vertikálně směřované anténě, měřit na základě rovnic (2) a (3) výškové profily C_T .

Při kvantitativních měřeních se však naráží na obtíže s vyhodnocováním koeficientu L . Atmosférická absorpce zvukových vln pro danou frekvenci silně závisí na teplotě a relativní vlhkosti vzduchu. Profily těchto prvků podél měřicí trasy obvykle nejsou známy s uspokojivou přesností. Nicméně i kvalitativní ocenění stavu spodních vrstev atmosféry, která se pomocí akustické sondáže dají získat, jsou velkým přínosem.

POPIS ČINNOSTI MONOSTATICKÉHO SODARU PODLE BLOKOVÉHO SCHÉMATU

Monostatický sodar vysílá krátké zvukové impulsy (délka řádově desítky nebo stovky milisekund) a zvukové vlny rozptýlené atmosférickými nehomogenitami (echo) jsou přijímány vysoce citlivým přijímačem na téže místě, odkud byly vysílány. Rychlost zvuku ve

vzduchu se mění s teplotou jen o několik procent. Každému echu tedy může být s uspokojivou přesností přiřazena vzdálenost od vysílače podle časového rozdílu mezi vysláním impulsu a návratem echa, podobně jako u radaru pracujícího s elektromagnetickými vlnami. Zesílené echo je pak zobrazeno na zapisovacím zařízení. Činnost systému popíšeme podle blokového schématu na obr. 2.



Obr. 2. Blokové schéma monostatického sodaru

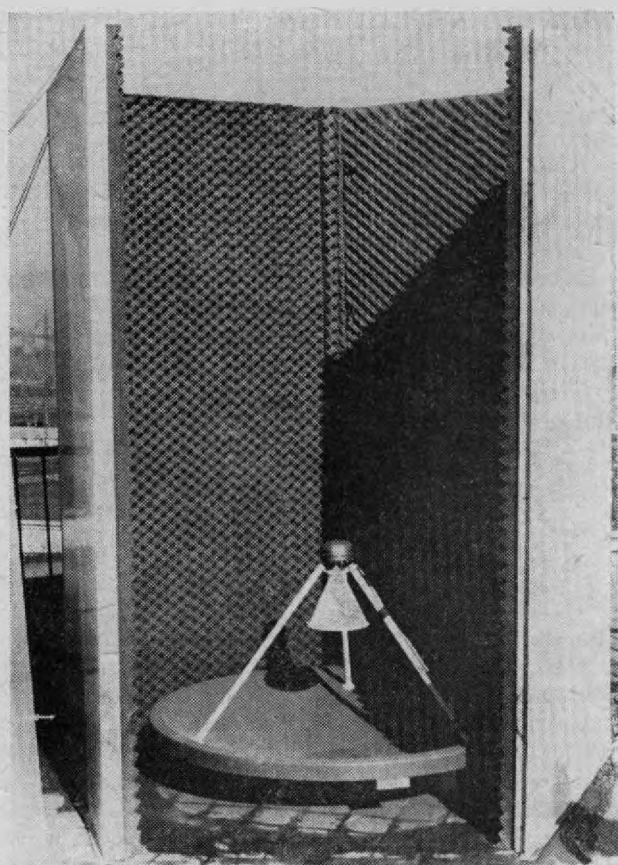
Časová řídicí jednotka 10 ovládá činnost celého systému. Spouštěcím pulsem aktivuje oscilátor 9 a obvody korekce zesílení 3. Anténní přepínač 1 se přepíná na vysílání, citlivé vstupní obvody přijímače jsou zablokovány, aby nedošlo k jejich poškození silným vysílacím pulsem. Oscilátor napájí přes koncový zesilovač vysílače 8 a anténní přepínač anténu, která je tvořena buď systémem reproduktorů a citlivých mikrofonů nebo parabolickým reflektorem, v jehož ohnisku je umístěn tzv. transducer. Transducer při vysílání pracuje jako výkonný reproduktor a při příjmu jako vysoce citlivý mikrofon. Anténa vyzařuje akustický výkon v podobě směřovaného paprsku do prostoru.

Po skončení vysílacího pulsu na povel řídicí jednotky připojí anténní přepínač anténu k obvodům přijímače. Echo zachycené anténou je zesíleno předzesilovačem 2. Další zesilovací stupeň 3 má zesílení proměnné s časem tak, aby echa z menších vzdáleností byla zesilována méně než echa ze vzdáleností větších. Tím se kompenzuje pokles toku akustického výkonu se čtvercem vzdálenosti. Obvody korekce upravují vstupní signál tak, že stejně intenzivním echům z různých vzdáleností odpovídá stejná úroveň signálu na výstupu korekčních obvodů.

Filtr 4, jehož střed pásma propustnosti souhlasí s vysílanou frekvencí, má za úkol potlačit hluky z okolí, které by se v signálu projevovaly jako rušivý šum. Obvody demodulátoru 5 a koncového zesilovače 6 upravují signál pro faksimilové zapisovací zařízení 7. Záznam je analogový, obvykle polotónový ve stupnici šedé, odpovídající intenzitě echa. Vodorovnou souřadnicí záznamu je čas, vertikální souřadnicí vzdálenost. Každému vyslanému impulsu odpovídá jeden řádek záznamu.

MONOSTATICKÝ SODAR MODEL 300 A JEHO VYUŽITÍ

Na observatoři HMÚ OSOČO v Tušimicích je od ledna 1976 v provozu monostatický sodar Model 300, výrobek firmy Aerovironment z USA. Jednotlivé části zařízení jsou zachyceny na přiložených snímcích. Na obr. 3 je parabolická anténa se zářičem v ohnisku, umístěná ve stínícím krytu (přední stěna krytu je odejmuta). Úkolem krytu je zeslabit intenzitu zvuku



Obr. 3. Anténa sodaru ve stínícím krytu (přední strana krytu odsunutá)

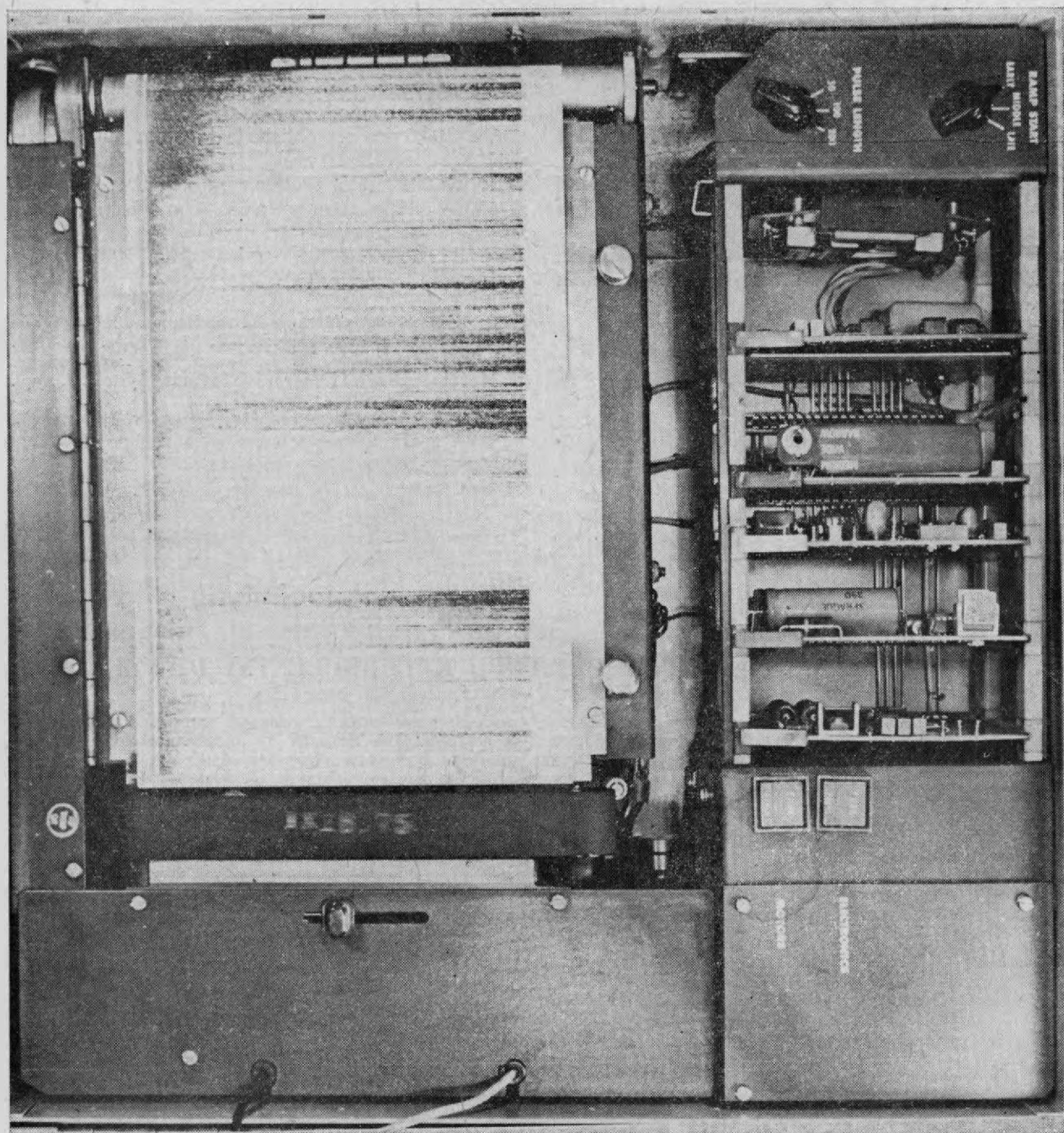
Tab. 1

Maximální dosah	1 500 m
Průměr parabolické antény	1,33 m
Frekvence vysílaného signálu	1 600 Hz
Délka pulsu	volitelná 50, 100 a 200 ms
Vysílaný výkon	100 W
Opakovací frekvence	1 puls za 27 s
Šířka pásma přijímače	volitelná 20, 40 a 80 Hz
Dosažitelná rozlišovací schopnost	10 m

vyzařovaného anténou do stran (na vedlejších maximech vyzařovací charakteristiky) a potlačit rušivé hluky z okolí. Obrázek 4 zachycuje řídicí a zapisovací jednotku, obsahující veškerou elektroniku a faksimilový zapisovač. Záznam se provádí elektricky, na speciální elektro-citlivý papír. Stupeň zčernání stopy zápisu je mírou intenzity echa.

V následující tabulce 1 jsou uvedeny nejdůležitější technické parametry zařízení.

Anténa je orientována vertikálně. Souřadnice záznamu jsou tedy čas (abscisa) a výška (ordináta). Jak vyplývá z teorie, detekuje monostatický sodar echa vyvolaná teplotními fluktuacemi podél spojnice vysílače—rozptylující objem, přičemž rozhodující je příspěvek fluktuací s vlnovým číslem $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, kde λ je vlnová délka vysílané zvukové vlny. Pro vysílanou frekvenci 1 600 Hz je tedy $k = 30$.



Obr. 4. Řídicí a zapisovací jednotka — elektronika a faksimilový zapisovač

Jakýkoli atmosférický děj, spojený s teplotními fluktuacemi popsanych vlastností, vyvolá tedy akustické echo. V zásadě se na záznamech dají rozeznat dva typy odrazu: horizontálně a vertikálně orientované. Horizontálně orientované záznamy přísluší odrazům přicházejícím z oblastí, kde se vyskytuje stabilní teplotní zvrstvení. V těchto oblastech dochází následkem stability k silnému potlačení vertikálních turbulentních pohybů velkých měřítek. Turbulence malých měřítek způsobuje v neadiabaticky zvrstvené atmosféře sodarem detekovatelné teplotní fluktuace.

Vertikálně orientované záznamy přísluší odrazům od oblastí, v nichž se vyskytují konvektivní výstupné proudy. Vhodné podmínky pro vytváření teplotních fluktuací potřebných vlnových čísel existují na hraničních plochách těchto proudů, kde probíhá vtahování

a kde jsou dostatečně velké horizontální gradienty potenciální teploty (Parry a kol., 1975).

V některých případech však rozlišení není tak zřejmé. Interpretace záznamů sodaru je dosud otevřený problém a výzkumy v tomto směru mohou vést k novým pohledům na procesy v mezní vrstvě atmosféry.

Za současného stavu lze vhodnou interpretací sodarových záznamů získat následující informace, použitelné v různých oborech meteorologie mezní vrstvy ovzduší:

1. výskyt stabilních vrstev, zejména inverzí teploty, výšku jejich hranic nad povrhem a jejich tloušťku;
2. výskyt konvektivních buněk při instabilním zvrstvení;

3. dobu trvání stabilních a instabilních typů zvrstvení, přechod jednoho typu v druhý a denní chod stability mezní vrstvy ovzduší;
4. hloubku směšovací vrstvy.

Sodar umožňuje získávat tyto informace průběžně a v reálném čase.

Monitorování podmínek stability v mezní vrstvě pomocí sodaru bude, jak vidno, zvláště užitečné pro výzkum škodlivých příměsí v ovzduší. Využitím sodaru pro tyto účely se již zabývala řada autorů. V naší literatuře je prvním příspěvkem tohoto druhu práce Koldovského (1976).

ZÁVĚR

Technický rozvoj sodaru a jeho využití v komplexu jiných moderních i klasických metod měření a zpracování dat nepochybně umožní meteorologům sledovat atmosférické procesy, o nichž je dosud známo jen málo nebo i procesy dosud zcela neznámé. Okamžitý efekt může využití sodaru přinést v oblasti, jíž naše společnost přikládá zvláštní význam — v oblasti ochrany životního prostředí.

Literatura:

- Little, C. G.:* Acoustic Methods for the Remote Probing of the Lower Atmosphere. Proc. IEEE, 57, 1969, s. 571—578.
- Parry, H. D., Sanders, M. J., Jensen, H. P.:* Operational Applications of a Pure Acoustic Sounding System. J. Appl. Meteorol., 14, 1975, s. 67—77.
- Koldovský, M.:* Akustické sondáže přízemní vrstvy ovzduší. [Rukopis.]