

電波音波複合探査装置 (RASS) の可能性について

光 田 寧・伊 藤 芳 樹

POSSIBILITY OF RADIO ACOUSTIC SOUNDING SYSTEM (RASS)

By *Yasushi* MITSUTA and *Yoshiki* ITO

Synopsis

New radio acoustic sounding system (RASS) proposed and planned by the present authors is described. RASS is one of remote sensing techniques and is able to provide temperature profile of the lower troposphere. The system proposed in the present paper is a combination of a S-band pulse radar and a frequency-controlled acoustic pulse transmitter and enables to detect the temperature profile by comparing received power radio signal from each acoustic wave front without Doppler analyses. This system needs rather high acoustic frequency, and the height range is limited to a several hundred meters.

1. ま え が き

近年の技術の進歩に伴って人間の社会活動の範囲は地表面のごく近くから地上数百mの範囲にまで拡がりつつあり、また社会活動の複雑化と共に気象環境に支配される部分が増してきたこともあって地上から1000 m ぐらいまでの高さの範囲、いわゆるプラネタリー境界層における気象環境に関する正確かつ密度の高い知識が必要とされるようになってきた。しかし反面において観測塔を建てることは困難であり、気球あるいは航空機による観測は精度および密度の点で大きな制約がある。特に飛行場の近くや市街地の上空では既往の手段では測定が難しい。このような理由で地上からの遠隔測定により風および気温を測定する方法を確立することが期待されている。

このような目的のための研究は現在各国において精力的に進められており、種々の方法が検討されているが、その比較観測をする目的で1979年9月には米国 Boulder において下部対流圏の測定方法のための国際比較観測が計画されている。著者等は先きに音響パルスを用いた探査装置の開発を行ない気温の変動についての測定を可能とし¹⁾、その後風速測定を可能とするところまで改良を進めることができた²⁾。しかし気温の絶対値をこの方法のみで探知することは不可能である。

気温の絶対値を測定する手段として考えられたものに電磁波と音波を組み合わせて用いる RASS (Radio Acoustic Sounding System) という装置がある³⁾。これは電磁波の反射媒体のない空間に音波によって空気密度の粗密を作ってそこからの反射を探知することによって空間の情報を得ようとするものである。この装置は米国スタンフォード大学において最初に考えられ開発が進められているがまだ実用の域には達していない。

著者等はこの装置の原理が発表された当時からこれに着目し検討を行ってきたが、スタンフォード大学において開発されている音響パルスと連続波ドップラーレーダを用いた方法は、われわれが応用するには技術的に問題が多いことが判ったので他の方法でこれを実行することを考えた。ここに述べるのは著者等の考えた、より簡単なパルスレーダを用いた RASS の方式であり、気温の分布の探査が可能なのである。ここでは従来から開発してきた音響探査器による風の計測法の実例とともにこの方式の原理的可能性を示し、下部対流圏の風と気温の連続的遠隔測定を可能とするための努力の過程の1つの記録としたい。

2. 音波探査装置 (sodar) による風速の測定

音波のみを使った遠隔測定法は sodar と呼ばれ逆転層や thermal plume の探知や風速測定のために開発され実用化されつつあるので、RASS について記述する前にこれについて簡単に触れておく。

音波の後方散乱強度 P_r は

$$P_r = q P_t E_r E_s \exp(-2\alpha R)$$

$$q = 0.002 C \tau k^{1/3} \frac{C_p^2 AG}{T^2 R^2} \quad (1)$$

で与えられる。ただし P_t は送信電力, E_r , E_s は各々送受信変換率, α は大気中での音波の吸収係数, R は探査距離, q は scattering volume のエネルギー反射率, C は音速, τ はパルス幅, k は送信音波の波数, T は絶対気温, AG はアンテナの有効面積とする。 C_p^2 は温度変動の structure constant である。

よく設計された sodar であれば大気中に $q > 10^{-16}$ 程度の反射能があれば受信信号を得ることができる。これは 1600Hz の音波を使用した sodar で $C_p^2 \approx 10^{-5} \sim 10^{-4}$ に相当する。最近の飛行機観測によれば大気成層が不安定な場合には C_p^2 の値は高さの $-4/3$ 乗に比例して減少するが、高さ 1000m で 10^{-4} 程度の値をとり、また中立安定の時でも $10^{-6} \sim 10^{-5}$ ぐらいの値をとることが明らかにされている⁴⁾。従って安定な場合を除いて高感度の sodar を用いれば、大気下層においては大気的全層において大気の乱れからの反射信号を得ることがほとんどの場合期待できる。この反射波の Doppler shift を測定すれば遠隔測定による風速の常時 monitoring が可能となるわけである⁵⁾。

鉛直方向に向けた sodar の反射信号の Doppler shift から鉛直風速 V_z は

$$V_z = \frac{C}{2} \frac{\Delta f}{f_0} \quad (2)$$

により得ることができる。ここで f_0 は送信周波数であり、 Δf は送受信周波数の偏移である。Doppler shift の計測には周期計測による方法と FFT による方法が現在用いられている。前者は装置が簡便であり、後者は noise に強いという特色がある。著者等はまず簡単な前者の方法を採用し、先に紹介した sodar に Doppler 解析回路を付加した。この system の block diagram は Fig. 1 に示す。高度差 10m に相当する時間毎に回路を trigger し、100 波の周期を測定すると同時に受波レベルを 8bit で A/D 変換し受信信号強度を知る形になっている。noise 判別のために周波数 counter gate を設けて外来雑音の排除を行なっている。Fig. 2 はこれを使用して測定した鉛直風速の例である。この図には同時に 213m の観測塔の 200m 高度に取り付けた超音波風速計によって測定した鉛直成分と、同高度の Doppler 風速を比較したものである。両者の相関はよくないが測定の状態が違いさらに測定位置が 100m 程度も離れており sample volume の違うことおよび鉄塔の影響による超音波風速計の誤差を考えれば、直ちに測定の是非を論ずることは無理である。今後さらにデータの蓄積が必要である。しかしこのように風速の測定が可能であるので、複数の inclined mode の sodar を使えば同様の解析法で水平風速・風向の鉛直プロファイルを探知することができる。

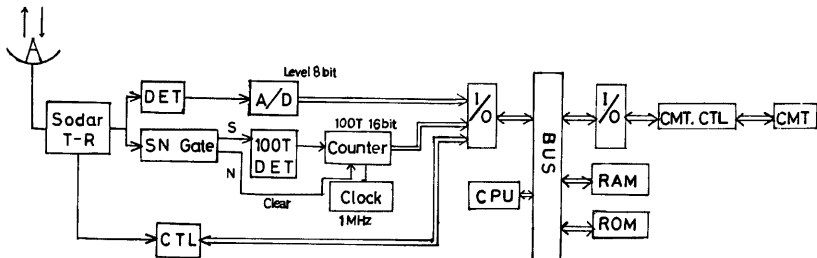
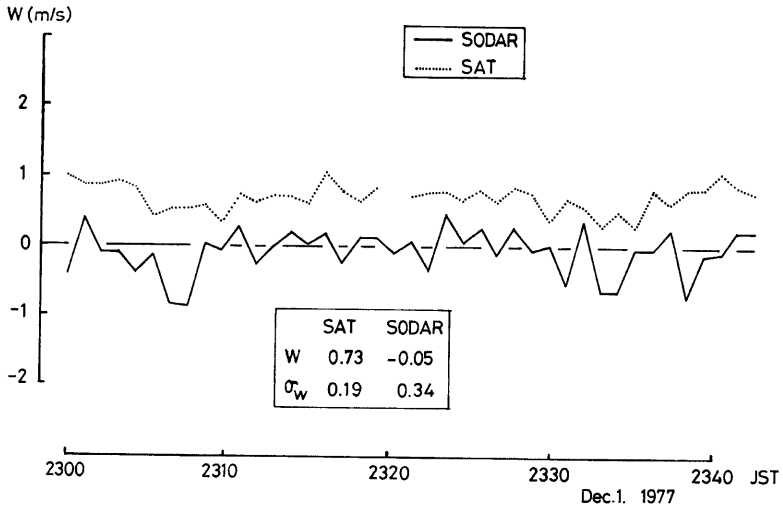


Fig. 1. Block diagram of the receiving circuit of the sodar for wind velocity measurement.



Vertical velocity by Sodar and SAT averaged every 64 sec.

Fig. 2. An example of comparison of vertical velocities as observed by the Sodar and the SAT on the tower at the height of 200m from the ground averaged over every 64 sec.

3. 電波音波複合探査装置（RASS）による気温の測定法

レーダによる音響パルスの Doppler tracking という RASS の基本的な手法は1961年に Fetter と Smith によって試みられたが、彼らは 22 kHz の超音波パルスを 10GHz 波レーダで Doppler tracking したために、音波伝播の際の大気による吸収が大きく探査距離は約 30m しかなかった⁶⁾⁷⁾。1972年に Marshall はもっと

Table 1. Review of existing world RASS's in comparison to the one proposed in the present paper.

	Stanford ³⁾ VHF-pulse Doppler- tracking	Stanford ⁸⁾ VHF-CW Doppler- tracking	SRI-NWS ⁹⁾ UHF-CW Doppler- tracking	RRL-Japan ¹²⁾ UHF-CW Doppler- tracking	Kyoto Univ SHF-pulse power comparison
AF					
frequency (Hz)	85	85	1000	1000	6900
power (W)	85	70	340(1700)	300	300
pulse width	100			5~200	420~490
antenna	3×3 (15inches)	3×3 (15inches)	10×10	1.5mφ	1.8mφ
beam width	16.8°	24°	10°	~15°	2.3°
RF					
frequency (MHz)	36.8	36.8	440	445	3050
power	5KW(peak)	8	1.0	100	60KW(peak)
antenna	2 Yagi	2×2 Yagi	2Helix	3mφ	3mφ
beamwidth	45°	30°	45°	~15°	2.7°

低周波の音響パルスを使えば探査距離が増大することを理論と実験から示し、事実 36.8 MHz レーダを使って 1.7km の距離の 85Hz 音響パルスからのエコーを受信することができた³⁾。それ以来 RASS は気温の遠隔測定の一手法としてスタンフォード大学において研究が行われてきている。わが国においては郵政省電波研究所でこの方法のものが現在試作されつつある。著者等がここで計画中の大気境界層研究用の RASS は、従来の Doppler tracking 方式において微小信号を Doppler 解析する困難を避けるためにパワー比較方式を用いることを考えた。Table 1 は現在計画中のものも含めて各研究機関が開発してきた RASS の一覧表である。これからわかるように従来 85Hz か 1kHz の音響パルスとパルスあるいは CW Doppler レーダが採用されてきている。これらが製作可能であることは立証されているが、Doppler 周波数測定から気温プロフィールを与えることにはいろいろな困難があり、実用に至っておらず、地上気温とのある程度の相関が得られるという段階が現状である。

RASS の測定原理

電波は大気中に屈折率の変動のある領域を通過するときその一部が散乱されるが、この屈折率の変動を音響パルスが伝播するときの空気の局所的な疎密によって人工的に作り出し、電波を後方散乱させてそれを解析しようとするのが RASS の基本概念である。Doppler tracking 方式の RASS はこの散乱波の Doppler shift を検出して反射体の動き、すなわち音速を求め絶対温度を計算するものであり次式の関係を利用する。

$$V_s = A\sqrt{T} \quad (3)$$

ここで V_s は音速で T は絶対気温、 A は定数で $A \approx 20.053$ である。実際の大气中においては水蒸気の影響が音速を変化させるので、その点も考慮する必要があり、(3)式は次のように書ける。

$$V_s = A\sqrt{T_s} \quad (4)$$

ただし T_s は湿度を考慮に入れた絶対仮温度であり、 $T_s = T(1 + 0.608 S)$ と書ける。ここで S は比湿を示す。

ところで散乱エネルギーは散乱体である空気粗密の間隔すなわち音波の波長 λ_s と電波の波長 λ_e の間に $\lambda_s/\lambda_e = 2$ なる関係が成り立つとき、コヒーレントに加算されて受信信号強度は非常に増大する。これは、Bragg scattering と呼ばれる現象であるが、このようにして $\lambda_s/\lambda_e = 2$ なる関係が成り立っていることと送信音波周波数を知ることによって、絶対温度を求めようとするのがここで考えるパワー比較方式の RASS である。すなわち音波の周波数を f_s 、波長を λ_s とすると音速 V_s は

$$V_s = f_s \lambda_s \quad (5)$$

であるから (4)、(5) 式より

$$T_s = \left(\frac{f_s \lambda_s}{A} \right)^2 \quad (6)$$

であり、 $\lambda_s/\lambda_e = 2$ である、すなわち Bragg scattering が起っているときには、

$$T_s = \left(\frac{f_s \lambda_e}{2A} \right)^2 \quad (7)$$

という関係が成り立つ。RASS において測定する温度は本質的にはこの絶対仮温度 T_s であるが絶対気温を求めるには

$$T = \frac{1}{1 + 0.608S} \left(\frac{f_s \lambda_e}{2A} \right)^2 \quad (8)$$

とすればよい。 T_s と T の差を相対湿度と気温の関数として表わしたのが Fig. 3 である。この図から高温高湿時には両者の間に湿度補正が必要となることがわかる。

また実際の大气中では、湿度の他に鉛直方向の音波の絶対空間における波長におよぼす鉛直風速の影響をも考えなければならない場合がある。すなわち音波の媒体である空気そのものが鉛直方向に運動しており、鉛直風速 W がある場合には (5) 式は

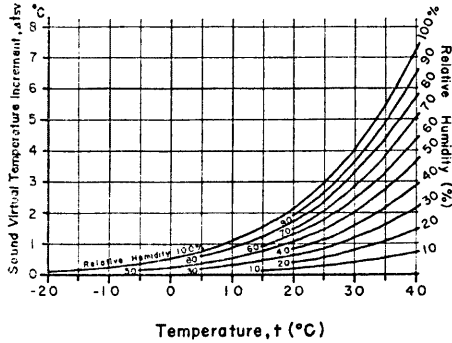


Fig. 3. Variation of sound virtual temperature increment (sound virtual temperature—temperature) with temperature and humidity after Mitsuta (1965).

$$V_s + W = f_s \lambda_s \tag{9}$$

と書きかえられねばならないので (6) 式は

$$T_s = \left(\frac{f_s \lambda_s - W}{A} \right)^2 \approx \frac{f_s^2 \lambda_s^2 - 2f_s \lambda_s W}{A^2} \tag{10}$$

となる。その結果、鉛直風速の存在による仮温度に与える影響 ΔT_s は

$$\Delta T_s = -\frac{2f_s \lambda_s}{A^2} \Delta W \approx -1.7 \Delta W \tag{11}$$

と書ける。したがって静穏大気を仮定して RASS により気温を求めた場合、1 m/s の鉛直風速の存在は約 1.7°C の気温測定誤差をもたらす。RASS により気温を求める場合、 $\overline{W} = 0$ と考えてもよいほど充分長い時間平均をかけるか、Doppler sodar を併用するなどの方法によって鉛直風速による誤差の補正をするなど何らかの操作を必要とする。

以上をまとめると RASS によって測定された仮温度は、鉛直風速を考慮して

$$T_s = \left(\frac{f_s \lambda_s}{2A} \right)^2 - 1.7W \tag{12}$$

と表現され、湿度が判っているならば気温は次のように書ける。

$$T = \left(\frac{f_s \lambda_s}{2A} \right)^2 - \Delta T_s - 1.7W \tag{13}$$

ただし W は上向き正とし、 $\Delta T_s = T_s - T$ (Fig. 3 参照) である。電波の波長 λ_s は気温や湿度によって変化する割合は音波と比して極めて小さいから一定であると考えてよく、散乱波に対して Bragg scattering の関係が成立していることと送信している音波周波数がわかっているならば温度測定が可能となる。この方法によれば微弱な受信信号を Doppler 解析するという難点は避けることができるはずである。

Marshall (1972) の解析によれば¹⁰⁾、風および乱流がない場合には RASS における受信パワー P_r は

$$P_r = 1.38 \times 10^{-16} \gamma n^2 G_s G_r G_a P_s \left[1 - \cos \left(\frac{\theta}{2} \right) \right]^2 \frac{1}{R^2} \exp(-\alpha R) \tag{14}$$

で与えられる。 n は音響パルス波数幅, G_r, G_s は各々レーダ送, 受信アンテナ利得, P_r はレーダ放射電力, G_s は音響送信アンテナ利得, P_s は音響放射電力, θ は音響あるいはレーダビーム幅のうち狭い方のビーム角である。 γ は $\lambda_s/\lambda_a=2$ のとき $\gamma=1$ をとり, $\lambda_s/\lambda_a \approx 2$ のときは相対反射係数とみなされるべきものであって,

$$\gamma = 4 \left(\frac{\lambda_a}{\lambda_s} \right)^2 \left[\left(\frac{\sin x}{x} \right)^2 + \left(\frac{\sin y}{y} \right)^2 - 2 \left(\frac{\sin x}{x} \right) \left(\frac{\sin y}{y} \right) \cos k_s (R_1 + R_2) \right] \quad (15)$$

と表わされる。ただし, $x = (k_s - 2k_r)n\lambda_a/2$, $y = (k_s + 2k_r)/n\lambda_a/2$, $k_s = 2\pi/\lambda_s$, $k_r = 2\pi/\lambda_a$, $R_2 - R_1 = n\lambda_s$ であり, R_1, R_2 は各々音響パルスの下面および上面までの距離である。受信信号の SN 比は熱雑音の最大パワー P_m によってきまる。

$$P_m = kBT_n \quad (16)$$

ただし, k は Boltzman 定数 (1.38×10^{-23}), B はレーダ受信機バンド幅, T_n は noise temperature であるから, SN 比は

$$SN = P_r/P_m = 9.9 \times 10^6 \gamma n^2 G_r G_s P_r P_s \left[1 - \cos \left(\frac{\theta}{2} \right) \right]^2 \frac{1}{R_2 BT_n} \exp(-\alpha R) \quad (17)$$

となる。

$G_r, G_s, P_r, G_s, P_s, \theta, B$ は電波送受信機と音波送信機に依存するパラメータであり, 音波と電波の使用周波数が定めれば

$$P_r \alpha \gamma n^2 \frac{1}{R^2} \exp(-\alpha R) \quad (18)$$

となって受信パワーは γ, n, R の関数となる。大気の音波吸収係数 α は周波数が増大するにつれて大きくなり, 絶対湿度にも依存する定数である (Fig. 6)。

Fig. 4 に 3050 MHz の電波を使用した場合の $R=600\text{m}$ における受信パワー比を示す。この図は $\lambda_s/\lambda_a=2$ のときの受信パワーを基準としているので, 相対反射係数 γ を表わしていることになる。この図からわかるように n が大きくなるほど受信パワーの λ_s/λ_a バンド幅が急激に減少する。パワー比較方式の RASS ではこのような λ_s/λ_a バンド幅が, 急激に減少する性質を利用して, $\lambda_s/\lambda_a=2$ が成り立っていることを検出する。すなわち送信音響パルスのある周波数間隔で掃引し, 受信電波の強度を比較すれば, $\lambda_s/\lambda_a=2$ の関係が成立する送信周波数のとき受信パワーが最大となり, n を大きくすれば気温分解能は良くなる。このように受信パワーが最大となる送信音波の周波数を知れば, その高さの気温を求めることができる。

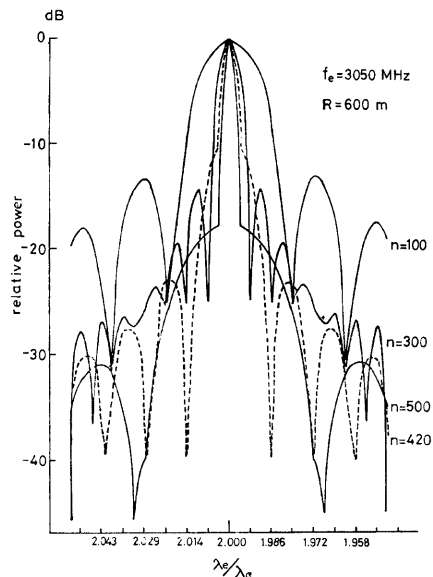


Fig. 4. The relative reflection coefficient (γ) as a function of n and λ_s/λ_a .

4. 新しい RASS の計画

現在、著者らの計画している S-band pulse RASS の概要を Fig. 5 に示す。音響パルスは大気状態の時間変化による測定の不安定を避けるために、ある周波数間隔をもつ連続した音波トレインとして発信し、その周波数範囲は地上温度計からの情報をもとに processor によって制御する。電波系としては S-band レーダを使用し、反射電波受信強度は高速で A/D 変換しレベルを検出する。1 回のレーダ探査毎の受信レベルを100回分ぐらいを平均したデータを1つの行とし、それを時間的に並べ Fig. 5 下図のような matrix の成分として processor に取り入れる。processor では各高度におけるレベル最大を判別することによってその発信音波周波数を知る、すなわち気温のプロファイルが得られる。

電波系として使用する S-band (3000 MHz 帯) は Table 1 に示した他の研究機関で用いられている電波周波数に比べて高い周波数である。これは先に述べたように受信パワーの比によって Bragg scattering の条件を検出するために、送信音波パルス波数幅, n を大きくする必要があり、このことは受信強度が n^2 に比例することからわかるように SN 比の改善にとっては有利であるが、この値を大きくとりかつ高度分解能をよくするためには従来よりも高い電波周波数を必要とすること、および、この周波数が簡単にレーダを入手できる最小の周波数であることによっている。

S-band レーダは船舶用レーダとして高性能で小型のものが開発されている。Table 2 に仮に JMA-265 型の性能諸元を示してあるが、これを例にとって上述の RASS の性能を算定してみると次のようになる。電波周波数は 3050 MHz であるから、Bragg scattering の関係を満たす音波周波数は、15°C において 6900Hz となる。(14), (17) 式中のパラメータのうち Table 2 より $P_t=60kW$, $B=10MHz$ 。電波送受信パラボラアンテナはペンシルビーム固定アンテナで直径を 3m のものと取替えて用い、音波アンテナの直径

を 1.8m, アンテナの開口効率を 0.5 とすると $G_r = G_t = 36.7dB$, $G_a = 38.2dB$ となる。 $P_a = 300W$ としビームパターンは Fraunhofer 回折近似により $\theta = 2.3^\circ$ が得られる。従って (14), (17) 式から

$$P_r = 1.21 \times 10^2 \gamma n^2 \frac{1}{R^2} \exp(-\alpha R)$$

$$SN = 3.04 \times 10^{15} \gamma n^2 \frac{1}{R^2} \exp(-\alpha R) \quad (19)$$

となる。気温としては常温 $T_a = 288^\circ K$ をとった。この方式の装置で気温測定を ΔT の分解能で行なおうとするならば (7) 式より送信音波の周波数間隔は

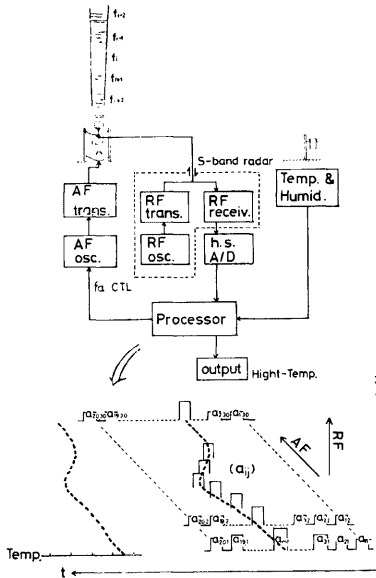


Fig. 5. Block diagram of the proposed S-band pulse RASS.

Table 2. Performance of the S-band radar MODEL JMA-265.

frequency	3025~3075MHz
peak power	60KW
pulse width	0.08μs
pulse repetition rate	3000Hz
intermediate frequency	30MHz
noise figure	10dB
IF bandwidth	10MHz
sensitivity	85 dBm

$$\Delta f_s = \frac{f_s}{2T_s} \Delta T_s \tag{20}$$

にとればよいことになる。S-band 帯において 1°C 毎の分解を考えると $\Delta T_s = 1^\circ\text{K}$ とすると $\Delta f_s \approx 12.0\text{Hz}$ の周波数間隔を必要とする、すなわち音波は、12Hz ピッチで掃引すればよいことになる。

受信機のパワー分解能を $N\text{dB}$ とすれば、電波と音波の波長の比を

$$\beta \equiv \frac{\lambda_e}{\lambda_s} = 2 \left(1 + i \frac{\Delta \lambda_s}{\lambda_s} \right) = 2 \left(1 + i \frac{\Delta T_s}{2T_s} \right) \quad i=0, \pm 1, \pm 2$$

とおいたとき、Fig 4 に示した反射率で λ_e/λ_s バンド幅を狭くして、音波が同調点から 1 単位以上ずれた時

$$10 \log \frac{P_r(\beta \approx 2)}{P_r(\beta = 2)} < -N \tag{21}$$

が成立するように n を定める必要がある。一方送信音波周波数範囲内における大気中での音波の吸収係数の差を考慮すると N は 10dB 程度以上にとる必要がある。 $N=10\text{dB}$ とすれば $\Delta T_s = 1^\circ\text{K}$ のとき(21)式が成り立つためには $n \geq 420$ が必要となる (Fig. 4)。

また RASS equation (14) が成立するためには電波トレインが音波トレインより長くなければならない。従って電波パルス幅を τ sec とすれば

$$n\lambda_s < 3 \times 10^3 \tau \tag{22}$$

が成り立つことが必要である。ここで仮に用いたレーダは Table 2 より $\tau = 0.08\mu\text{sec}$ であるから n は 490 以上とすることはできない。一方、上で述べたように分解能を維持するためには、 n は 420 以上でないといけない。従って n は $420 < n < 490$ 、従って音波のパルス幅は約 60ms に選べばよいことになる。このとき高度分解能 h は

$$h = n\lambda_s \tag{23}$$

であるから 20~24m 程度になる。

今 $n=420$ とした場合に(19)式の SN 比を与える式により種々の相対湿度に対する探査可能な高度を示したのが Fig. 6 である。図の右上には吸収係数の周波数および湿度に対する依存のようすを Harris (1966)

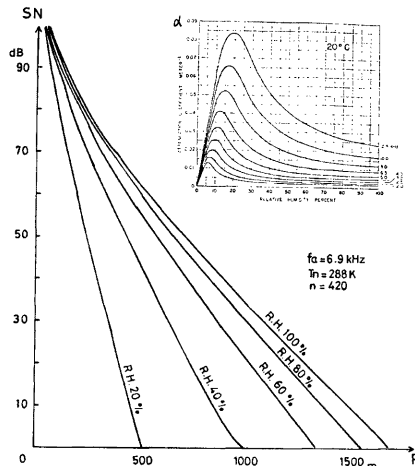


Fig. 6. Signal to noise power ratio as a function of relative humidity and range.

の室内実験結果により示してある。これによれば例えば相対湿度が40%で一定とするならば約900mまで探査可能であることがわかる。しかし実際の装置の雑音は(16)式の P_n よりも大きく、JMA-265型の場合、最小感度は -85dBm くらいである。従って Fig. 6 の値よりも SN 比が $15\sim 20\text{dB}$ 低下することになり、相対湿度40%では700m程度の探査高度になる。

しかしながら風によってビームが流される効果や乱流の影響による波面のコヒーレンシの劣化の問題により探査高度はさらに制限される。別な理論解析によると、強い乱流下では受信パワーは R^{-2} 比例ではなく $R^{-18/5}$ に比例しているとも言われている¹¹⁾。従ってその場合にはここで考えたより減衰は大きいことになり、探査高度を大きくするためにはもっと低周波を用いなければならないかもしれない。

5. あとがき

音波探査装置 (Sodar) により風速の、また電波音波複合探査装置 (RASS) により、気温の鉛直プロファイルの常時 monitoring が可能であることを示した。ここに紹介した power 比較方式の RASS の場合、基本的には数百メートルまでの気温プロファイルを与えることが期待できる。しかしながら実用上は先にあげた種々の原因により探査高度が著しく制限されることが予想されるので、S-band より低い周波数帯域での使用を検討する必要があるかもしれない。この装置の実現までにはまだ日もあるので、さらに理論および実験的な検討を進めていく予定である。

最後に RASS に関する色々な御助言を頂いた電波研究所福島園博士に感謝したい。

参 考 文 献

- 1) 光田 寧, 伊藤芳樹: 音波探査装置による大気境界層の観測, 京都大学防災研究所年報 第20号 B-1, 1977, pp. 157-172
- 2) 伊藤芳樹, 光田寧: Sodar による大気境界層の遠隔測定, 日本気象学会秋季大会講演予稿集, 1978, p. 188.
- 3) Marshall, J. M., A. M. Peterson, and A. A. Barnes, Jr.: Combined Radar-Acoustic Sounding System, Applied Optics, Vol. 11, No. 1, 1972, pp. 108-112.
- 4) Koprov V. M. and L. R. Zwang: Characteristics of Very Small-scale Turbulence in a Stratified Boundary Layer, Izv. Atmospheric and Oceanic Physics, Vol. 2, No. 11, 1966, pp. 1142-1150.
- 5) Kaimal J. C. and D. A. Haugen: An Acoustic Doppler Sounder for Measuring Wind Profiles in the Lower Boundary Layer, J. Appl. Meteor., Vol. 16, Dec., 1977, pp. 1298-1305.
- 6) P. L. Smith, Jr.: Remote Measurement of Wind Velocity by the Electromagnetic Acoustic Probe, 1, Midwest Research Institute, Kansas City, 1961.
- 7) R. W. Fetter: Remote Measurement of Wind Velocity by the Electromagnetic Acoustic Probe, 2, Midwest Research Institute, Kansas City, 1961.
- 8) Frankel, M. S. and A. M. Peterson: Remote Temperature Profiling in the Lower Troposphere, Radio Science, Vol. 11, No. 3, 1976, pp. 157-166.
- 9) Frankel, M. S., N. J. F. Chang and M. J. Sanders, Jr.: A High-frequency Radio Acoustic Sounder for Remote Measurement of Atmospheric Winds and Temperature, Bull. Amer. Meteor. Soc., Vol. 58, No. 9, 1977, pp. 928-934.
- 10) Marshall, J. M.: A Radio Acoustic Sounding System for the Remote Measurement of Atmospheric Parameters., Sci. Rep. No. 39, SU-SEL-72-003, Stanford Electronics Labs., Stanford Calif, 1972.
- 11) Clifford, S. F. and Ting-I Wang: The Range Limitation on Radar-Acoustic Sounding Systems (RASS) due to Atmospheric Refractive Turbulence, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. AP-25, No. 3, 1977.
- 12) 福島 嗣, 秋田錦一郎, 増田悦久: ラス・レーダーの開発に関する研究, 郵政省電波研究所, 特調費報告, 1978.