10 GHz 帯高仰角伝搬時の降雨減衰特性

NHK 総合技術研究所 金 原 晃

放送衛星など 10 GHz 以上のマイクロ波を使用した衛星・地上間通信の回線設計で最も重要なパラメーターである高仰角の降雨減衰量につき、観測方法とその結果を述べた。減衰量の観測は、太陽雑音、大気雑音を受信し、その雑音温度から換算する方法によった。当所での観測は 11.8 GHz を受信し、同時に降雨強度の測定をそれぞれ連続で行なっている。また、上空の雨雲の構造を気象レーダーによる観測例により調査した。上記の観測から、地上の瞬時降雨強度と減衰量の関係を求め、降雨資料から実験的に減衰量を推定する方法を提案した。

1. ま え が き

現在、衛星・地上間の実用回線には 7 GHz 以下のマイクロ波が利用されているが、将来予想される通信量の増加に対処するために 10 GHz 以上の電波も使用することが考えられ、また、放送衛星用としても 12 GHz 帯が候補に上っている。

しかし、10 GHz 以上のマイクロ波回線では、大気圏の雨、雪、霰、氷晶などによる減衰が大きく、また酸素や水蒸気の分子により特定の周波数帯域で大きな減衰を生じることが知られている¹⁾。

上記の帯域で最も大きな減衰を生じるのは降雨で、その影響はとくに地上の低仰角回線で著しい。そのために古くから降雨減衰の理論的ならびに実験的研究が行なわれて、その結果として地上回線については 35 GHz 帯までの回線設計に役立つ基礎資料が得られている^{1)~3)}。

しかし、衛星通信のような高仰角の伝搬における降雨減衰は新しい研究課題で、数多くの未解決の問題を残している。その主な理由は、この種の研究に対する要求が高まったのが比較的近年であること、上空の雨域構造や降雨の測定ならびに伝搬実験が地上波の場合よりも困難なためである。

当研究所では、衛星を放送に利用する研究の一環として 1967 年から高仰角伝搬の研究に着手し、太陽雑音および大気雑音を利用した降雨減衰量の観測を行なっている。本文では、これらの観測法とその結果を中心に報告

し、さらにレーダーを使用して上空の雨域構造を観測する方法にもふれている。なお、最近種々の機関でもこの方面の研究を開始している。すなわち、電気通信研究所では 1969 年から観測を開始し、電波研究所、KDD 研究所でも計画を進めている。諸外国では、Bell 研究所⁴⁾で 1967 年から観測を行なっているほか、英国が観測法の標準化を CCIR に提案している⁵⁾。

2. 減衰量の観測方法

2.1 観測方法のあらまし

高仰角電波伝搬の観測は、静止衛星の電波を連続受信して、低仰角の場合と同様な観測および解析を行なうことが望ましいが、現状では信号源が得難いので、当所では容易に実施できる次の観測方法を採用している。

- (i) 大気雑音を観測して、減衰量を推定する。
- (ii) 太陽雑音を受信し、その減衰から降雨減衰量を推定する。
- (iii) 気象研究所のレーダーで観測した雨雲のデータから上空の雨滴分布を求めて、これから減衰量を推定する。

これらの方法のうち、(i)と(ii)を比較すると、減衰量が多いときは(ii)の方法が、減衰量が少ないときは(i)の方法が他方よりも精度が良い。本研究の目的は減衰量が多いときを対象としているので、(ii)の方法を優先し、昼間は(ii)の方法を、夜間は(i)の方法を採用し 11.8 GHz で連続観測をしている。このほか、1956 年から名大空電研究所で続けられている 9.4 GHz での太陽雑音の観測資料からも(ii)の方法で減衰量を推定している。

"Attenuation due to Precipitation in the 10 GHz Band at the Propagation with Higher Angles of Elevation" by Akira Kinpara (NHK Technical Research Laboratories, Tokyo)

(iii)の方法は、レーダーで各高度からの雨雲による反射波の強度を観測するもので、減衰量の測定よりも上空の雨域構造の解析に利用する目的で観測資料の解析を進めている。

2.2 大気雑音を観測する方法

受信空中線を天空に向けたときに受信される雑音のうち、大気圏から発生する雑音（以後、大気雑音と呼ぶ）から減衰量を推定する方法である。

この大気雑音は微弱であるが、発生機構からみて受信機内部雑音などと比較しておおよそ周期の変動のみに注目すればよいので、次に述べるディッケ形受信機を用いて観測する。この受信機は、受信信号（大気雑音）と常温負荷から発生する標準雑音とを比較して測定する。すなわち、両者をスイッチで切替えて受信し、これを同期検波器で復調すると受信雑音電力に比例した出力が得られる。この受信機は検波回路の時定数を大きくとっているため、標準雑音と受信雑音の平均された値の差が出力に現われる。この受信機の感度は検波出力のふらつきによりきまるが、このふらつきは雑音の統計的性質により（雑音指数）/（受信帯域幅×検波時定数）^{1/2} に比例する。そこで受信帯域幅と検波時定数を大きく選べば、受信機内部雑音よりもはるかに小さい雑音を測定できる⁶⁾。

当所の受信機の接続を図1に、その特性を表1に示す。この受信機では、利得のゆるやかな変動により生じる誤差を防止するために、標準雑音源で1時間に1回利得の自動校正をする。標準雑音源には雑音放電管を使用し、点火時の雑音温度を尺度にして雑音を測定する。図1の

表1 ディッケ方式受信装置特性

受信中心周波数 (MHz)	11,830 および 11,770
受信周波数帯域幅 (MHz)	10
局部発振器周波数 (MHz)	11,800
雑音指数 (SSB) (dB)	10
ディッケ変調周波数 (Hz)	223
検波後の積分時定数 (sec)	1
空中線直径 (m)	1φ
空中線利得 (dB)	38
空中線開口角 (°)	180

受信機で雑音放電管を点火したときに入力に加えられる雑音温度 T_n は、

$$T_n = (\text{放電管雑音}) \times (\text{方向性結合器結合度}) \\ = 11,100 \times (1/69) = 160.5 (^{\circ}\text{K}) \quad (1)$$

大気雑音および標準雑音検波出力をそれぞれ m_a , m_n とすると、大気雑音温度 T_a は（付録1（付・6）式参照）、

$$T_a = T_{0s} - m_a T_n / (m_n - m_a) \quad (2)$$

ただし、常温負荷の温度: $T_{0s} = 333^{\circ}\text{K}$

放電管の雑音温度: 11,100°K

方向性結合器結合度: $-18.4\text{dB}(1/69)$

一方、降雨による減衰量 A は、周知のように自由空間伝搬を規準にして距離 r の点の減衰定数 α が減衰層 r_1 から r_2 まで分布している場合に、(3)式で与えられる。

$$A = \exp\left(-\int_{r_1}^{r_2} \alpha dr\right) \quad (3)$$

この減衰定数 α は雨滴の電波に対する等価減衰断面積 (cross section) $Q_T(D)$ の和として、(4)式で与えられる¹⁾⁻³⁾（付録2参照）。

$$\alpha = \int_0^{\infty} N_D Q_T(D) dD \quad (4)$$

D : 雨滴の直径, N_D : 単位体積中に分布する直径 D の雨滴の粒子数

水滴を誘電体球として境界値から解析した結果によると、波長 λ が $\lambda \gg D$ のとき $Q_T(D) \propto D^3$ となる。(4)式の N_D は当然降雨強度の関数となる。この関係は Laws & Parsons⁷⁾ や Ryde⁸⁾ により観測され、その結果を用いて一様な降雨に対する降雨強度と減衰率の関係が(5)式で与えられている。

$$10 \log A = KR^{\gamma} \text{ (dB/km)} \quad (5)$$

R : 降雨強度 (mm/h), K と γ は周波数で定まる定数で、 R と A は図2の関係となる⁹⁾。図2によると 11.8GHz では同じ R に対して 9.4GHz の dB で約 2 倍の減衰を生じることがわかる。

図1 ディッケ形受信機

Block diagram of radiometer. (Dicke type)

図2 降雨強度と減衰率の関係 (計算値)

Relation between the attenuation rate and the rain fall rate derived from theoretical value.

このように減衰により生じる雑音温度 T_a の計算には従来は、抵抗減衰器から発生する熱雑音と同様と考えた(6)式が使用されてきた⁸⁾。

$$T_a = \int_0^\infty T \alpha \exp\left(-\int_0^r \alpha dr\right) dr \quad (6)$$

T : 減衰層の温度(°K), r : 減衰層の貫通距離

しかし、この式は理論的に正確ではない。すなわち、電波の減衰を生じる水滴の誘電率を $\epsilon_1 - j\epsilon_2$ とすると¹⁰⁾ この誘電体球による減衰は ϵ_2 により生じる吸収の他に ϵ_1 による散乱がある。そこで、筆者はこの散乱を考慮して(6)式に次のような補正を加えた。

まず、 $Q_T(D)$ を解析結果の吸収断面積 $Q_A(D)$ と散乱断面積 $Q_S(D)$ とに分離して、それぞれの減衰定数を α_A, α_S とする。このうち α_A により生じる雑音温度は、(6)式と同様であるが、散乱による減衰定数 α_S についてみると、この種の減衰により発生する雑音はないが、地面から放射される熱雑音が雨滴で散乱されて受信される雑音を考えなくてはならない。したがって、これを考慮すると大気雑音は(7)式のようなようになる(付録2参照)。

$$T_a = \int_0^\infty T_A \alpha_A \exp\left(-\int_0^r \alpha dr\right) dr + \int_0^\infty T_B \alpha_B \exp\left(-\int_0^r \alpha dr\right) dr \quad (7)$$

ここで、

$$\alpha = \alpha_A + \alpha_B + \alpha_F \quad (8)$$

ただし、 T_A, T_B はそれぞれ雑音発生源の温度、 $\alpha_A, \alpha_B, \alpha_F$ おおの吸収、後方散乱、前方散乱による減衰定数。これらのうち α_F は受信雑音温度に関係しない。

この $\alpha_A, \alpha_B, \alpha_F$ はそれぞれの等価断面積 $Q_A(D), Q_B$

図3 雑音温度と減衰量の関係

Loss as a function of T_a through a layer of uniform precipitation.

(D), $Q_F(D)$ と上記の Ryde の観測例による N_D とから(4)式と同様の方法で求めた。これらの $\alpha_A, \alpha_B, \alpha_F$ を(7)式に与えて計算した減衰量と雑音温度を図3に示す。この計算は雨域内の降雨が一定でその厚さが3km、温度 T_A は高度が高くなるのにしたがって7°/kmで低下し、 T_B は地面が雑音源なので地上の温度 T_0 という雨域のモデルを仮定して行なった。

次に、この換算法の精度を検討する。この計算では、 $r_t=3$ kmとしたが、実際の雨では変化することが予想されるので、極端な例として(3)式による減衰量が一定でも雨が10kmまで一様に分布しているときと、0のところに集中しているときの雑音温度とを $r_t=3$ kmのときと比較しても、その差 ΔT_a は図4に示すように雑音温度で6°以下、比率でも10%以下で、しかも減衰量が小さいときに比率は大きいので、このために生じる誤差は図3の勾配からみて小さい。なお、

$$\Delta T_a = |T_a - T_a(r_t=3\text{km}) - T_a(r_t=0 \text{ or } 10\text{km})| \quad (9)$$

しかし、図3の曲線は雑音温度が高くなると、その勾配が大きくなるので、このような場合は T_a の誤差が換

図4 減衰層の厚さが変化したときに生じる誤差標準 ($r_t=3$ km)

Error caused by the thickness of the precipitation layer.

算した減衰量では大きな差になる。したがって、この観測法は大きな減衰量の測定にはあまり適さない。

この方法で大気雑音から換算した減衰量を電気通信研究所の観測結果を用いて検定する。通研では太陽雑音と大気雑音を独立に同時に観測し、2.3 節の (10) 式で減衰量を求めている。通研の報告¹²⁾には、この減衰と (6) 式を集中定数にした $T_a = T(1-A)$ により求めた減衰量もまた発表している。そこで上式で求めた結果をこの式と (7) 式の差で補正すると、ほぼ前者の結果と一致するので、このことから (7) 式の方法は実験的にも裏付けされた。

2.3 太陽雑音による方法

この方法は太陽を信号源として利用する方法である。太陽から放射される雑音電波には太陽面の黒体放射による雑音と爆発により発生する雑音とがあるが、ここではほぼ一定の電力を連続放射する前者に注目する。

この雑音の変動は、降雨などによる減衰量の変化よりも周期が長く、振幅が小さいので、太陽雑音を高仰角伝搬観測の信号源として利用できる。

太陽雑音は上記のディック形受信機で受信し、空中線は赤道儀で自動的に太陽を追従する。太陽自体の 12GHz 帯での雑音温度は 10,000°K 以上あるが、受信空中線の視半径は表 1 のように 1.5° で太陽の視半径約 16' よりも広いので、実効的な受信雑音温度 T_r は約 520°K (晴天時の観測値) となる。

受信雑音温度 T_r と減衰量 A_θ との関係は、上記の T_r と T_a を用いて (10) 式となる。

$$T_r = T_a A_\theta + T_a \quad (10)$$

(10) 式の雑音温度のうち T_r は上記の観測値が利用できる。また、 T_r は観測値であるが、 T_a は同時に観測で

図 5 減衰量と受信太陽雑音温度の関係
Loss as a function of receiving Solar radiation.

きないので、(7) 式により A_θ から近似的に求めた値を用いて (10) 式から A_θ と T_r の関係を求める。この計算結果は図 5 となるので、この関係を用いて T_r から A_θ を換算している¹²⁾。

太陽の仰角は時刻とともに変化するので、観測した減衰量は cosec 則、すなわち減衰層の貫通距離が仰角の cosec に比例するとし、静止衛星*を考慮して仰角 45° に換算した。

$$10 \log A_n = 10 \log A_\theta \frac{\sin \theta}{\sin 45^\circ} \quad (\text{dB}) \quad (11)$$

ただし、 θ = 観測時の太陽の仰角、 A_n = 規準化減衰量

2.4 レーダー観測による方法

この方法は、レーダーで雨雲の各高度からの反射電波強度 z を観測する。 z は受信電界強度を反射点までの距離損失とレーダー定数で補正した雨の等価断面積を示す因子で、この z と降雨強度 R との関係は雨滴の直径分布 N_D とその直径と落下速度との関係から導びかれた (12) 式が知られている¹³⁾。ただし、 B 、 β は上記の降雨特性から求まる定数。

$$z = BR^\beta \quad (12)$$

z の観測値の高度および時間変化から雨域構造や bright band (気温 0°C 層、みぞれの状態で反射と減衰が大きい) などの気象状態がわかる。

さらに、(12) 式で求めた R を (5) 式に用いると減衰率 A_r は、

$$10 \log A_r = K \left(\frac{z}{B} \right)^{7/\beta} \quad (\text{dB/km}) \quad (13)$$

となる¹⁴⁾。(13) 式を用いればレーダー観測資料の z から総減衰量を積算できるが、(12)、(13) 式の定数 B 、 β は雨の種類や地域により変化することが知られていて、今後さらに調査を進める必要がある。

3. 降雨減衰の観測結果

東京で 11.8GHz で 1967 年 9 月～1969 年 12 月に観測した、太陽雑音と夜間の大気雑音、豊川の 9.4GHz の 1964 年 8 月～1969 年 8 月の太陽雑音をそれぞれ集計した統計量と、これらから得た降雨と減衰量との関係、さらに降雨の資料から実験的に減衰量を推定する方法について明らかになった点を述べる。また、レーダーによる観測例から求めた上空の雨域構造と減衰量についてもふれる。

3.1 減衰量**と降雨強度の統計量との関係¹⁵⁾

* 日本向けの静止衛星を東経 135° の赤道上に打上げると、仰角は東京で 48°、札幌で 40°、九州南端で 54° となるので、代表的な仰角として 45° を採った。

** 以後減衰量とは規準化した減衰量を指す。

図 6 減衰量が縦軸の値を越す時間率 (豊川 9.4 GHz)
Percentage of time to attenuation due to precipitation duration.

表 2 年間総降水量

東京		
年 度	年間総降水量 (mm)	平均との比較
1959	1601.0	102.3
1961	1260.2	81.0
1962	1256.0	80.0
1963	1575.5	101.0
1964	1138.9	73.0
1965	1596.0	102.0
1966	1643.5	105.0
1967	1023.3	65.5
1968	1491.0	95.5
平 均*	1563.0	100.0

* 平均値は 1931~1960 の 30 年間の平均 (理科年表による)
年間総降水量はお天気相談所提供の資料による

豊 川		
年 度	年間総降水量 (mm)	平均との比較
1965	1598	139
1966	1237	100
1967	753	61
1968	1352	109
平 均	1235	100

建設省の資料による。観測期間は 4 月 1 日~12 月 15 日

9.4 GHz の観測資料を集計した年単位減衰量の時間率は図 6 のように時間率 0.03% 以下では同一時間率に対する減衰量が年度により大きく変動する。一方、同一期間の年間降水量は表 2 のように同じ傾向で変化するが東京、豊川ともにそのばらつきは小さい。このことは平年よりも多雨の年は大きな減衰を生じる強雨発生回数の比率が大きいくことを示す。このことから大きな減衰量の時間分布を知るためには、総雨量ではなく瞬時の降雨強度を知る必要があることがわかる。

次に、減衰量と 1967 年末からそれぞれの受信点で観測している降雨強度とのおおのこの年単位の時間分布は、図 7 のように互いに相似の傾向を持っているので、この関係を用いて降雨強度時間分布から減衰量時間分布を推定する方法として等価貫通距離を考えた。

この方法は、雨が一定の高度まで地上と同じ状態で一緒に降っていて、その雨域の中では既知の降雨強度と減

(a) 東京 11.8 GHz

(b) 豊川 9.4 GHz

図 7 減衰量および降雨強度の値が縦軸の値を越す時間率
Percentage of time to attenuation and rate of surface rain fall.

衰量の関係が適用できると仮定する。この式を用いて降雨強度と同じ時間率における減衰量値から換算した雨域の厚さ、すなわち、等価貫通距離は 30 mm/h 以上の雨では 11.8 GHz、9.4 GHz とともに約 3.3 km となる。ただし、雨が弱いときは雨雲による減衰が無視できないので、その値は厚くなる。雨雲による減衰は約 1 dB が観測されているので、これを観測した減衰量から差引くと等価貫通距離は降雨強度に関係なく約 3.3 km となる。そこで、以上の関係を用いて降雨強度時間分布から減衰量の時間分布を推定すると図 7 の曲線 c となり、広範囲にわたり実測値と一致する。

今回集計した期間に観測された最大の減衰量としては

図 8(a) 雑音温度と降雨強度の同時観測記録 (東京 11.8 GHz, 1967. 11. 30)

Example of correlation between measured surface rain fall rate and sky-noise temperature.

図 8(b) 降雨強度と減衰量の同時観測記録 (東京 11.8 GHz, 1969.5.17)

Example of correlation between measured surface rain fall rate and attenuation due to precipitation.

図 9 降雨強度と雑音温度の相関 (東京 11.8 GHz)

Crosscorrelation function between surface rain fall rate and sky-noise temperature.

東京で 1968 年 9 月 5 日の雹を伴った雷雨により約 15dB が観測された。この雷雨の最大の降雨強度 (1 分間) は 263mm/h であった。ただし、日没前後の仰角の低いときは貫通距離が長いので観測不能 (減衰量無限大) の場合もあった。

豊川では、1965 年 9 月に 12dB が観測された。

3.2 減衰量と降雨強度の同時観測結果の相関

図 8 に減衰量と降雨強度の同時観測結果を示す。両者

図 10 レーダで観測した雨域構造
Contour of "Z" in the rain cloud, measured by meteorological radar.

表 3

月 日	雨の状態	降雨強度(最大) (mm/h)	B	時間的対応
'68. 8. 26	低気圧, 対流性	23	100	やや不良
'68.10. 4	秋雨前線, 地雨性	10	50	良
'69. 5. 17	寒冷前線, 対流性	62	150	良

を照合すると、よく対応しているので相互相関を求めると図 9 となり、降雨強度が減衰量より 2～3 分遅れたとき最大の相関係数があらわれ 0.8～0.5 となる。この値は強い雨のとき大きい。

3.3 レーダー観測結果から換算した減衰量

レーダー観測の例として気象研究所（当所の 7.5 km 北 15° 東）のドプラーレーダー（9.375 GHz, 0.25 μs/パルス, パルス繰返し周波数 4 kHz）で観測した上空の雨域分布を図 10 に示す。1968 年 10 月 4 日の例では約 4 km に、1969 年 5 月 17 日の場合は約 3 km のところに強い反射を示す bright band (0°C 層) がみられる。

次に、この z の分布から (13) 式で減衰率を求めて貫通路にそって積算して減衰量を求める。しかし、(12) 式の定数 B は上述のように雨の種類により異なるので、(13) 式で求めた減衰量と当所で太陽雑音から求めた減衰量との照合から B を求め、これを表 3 に示した。このように雷雨など対流性の雨では B が大きく、地雨性の場合は小さい。このようにして求めた換算値と実測値の時間的対応を見ると図 8 (b) の例のように前線性の雨ではよく一致した。図 8 (b) では寒冷前線の通過速度を用いて測定点間の時間ずれを補正した。しかし、低気圧性の雨の例ではこのような良い対応は得られなかった。

以上の結果によると、減衰は主として高度 2～4 km にある bright band 以下の z が大きい範囲で生じる。一方、 z の分布を見ると、地面に近いほどその値が大きくなる傾向があるので、これを考えると上述の等価貫通距離から推定した雨域の厚さ約 2.3 km (仰角 90°) は上記の bright band の高さより少し低くなっている、統計量として妥当な値と考えられる。

5. む す び

11.8 GHz と 9.4 GHz の高仰角伝搬の観測から得られた降雨減衰特性について、現在までに明らかになった結果の要点は次のとおりである。

(1) 太陽雑音および大気雑音を観測してそれぞれ降雨減衰量を推定する方法は、両者とも減衰量が大きいときに観測精度が低下するが、両者を比較すると、前者は減衰量が大きいとき、後者は小さいときに他方より精度が良い。

(2) 観測結果によると、年単位の減衰量時間分布は、図 6、図 7 より 11.8 GHz で時間率 0.01% (約 52 分)

に対減衰量は約 7 dB (1968 年, 1969 年), 9.4 GHz では多雨の 1965 年で約 7 dB, 並通の年 (1968 年) で約 4.5 dB である。

(3) 年単位の減衰量時間分布は図 6 のように時間率 0.03% 以下の減衰量の値が年度により大きくばらつく。

(4) 降雨減衰量を求めるためには、電波通路上の雨域構造を知る必要がある。しかし、観測結果によると降雨強度と減衰量の統計量から、雨域内の減衰率を一定と仮定して等価的な減衰層 (雨域) の貫通距離を求めると 11.8 GHz, 9.4 GHz とともに約 3.3 km となり、この関係を用いて、地上で観測した降雨強度から減衰量を推定できる。¹⁾

(5) 地上で観測した降雨強度と減衰量との相関は、減衰量とこれから 2～3 分遅れた降雨強度のものが最大で、強雨では相関係数が大きく 0.8 となることもある。

(6) レーダー観測資料の代表例について、その反射強度から減衰量を換算し、これと太陽雑音から求めた結果とを照合して時間的対応をみると、前線性の雨では一致する。

以上、東京と豊川で観測した降雨減衰の統計量を中心に報告した。このうち、(1)～(4)の結果は 1969 年の CCIR に報告した^{16) 17)}。

今後、さらに観測を続けて統計的解析を進めるとともに、レーダー観測等から得られる雨域構造の高度分布や移動速度をあわせ用いて降雨減衰の解析を進めたい。

この研究を進めるにあたり、太陽雑音観測資料を提供された名古屋大学空電研究所 田中春夫教授、レーダー観測資料を提供された気象研究所 内藤恵吉室長、ご指導をいただいた遠藤敬二主任研究員、安東平一郎部長、木名瀬亮主任研究員に深く感謝する。

(昭和 43 年 6 月 4 日受付, 昭和 44 年 11 月 3 日再受付)

〔参 考 文 献〕

- 1) D. Kerr: Propagation of Short Radiowave, MIT Radiation Lab. Series 13, McGraw-Hill Book Co. (1951) 445, 664
- 2) J. A. Stratton: Electromagnetic Theory (1941) 563
- 3) J. W. Ryde and D. Ryde: Attenuation of Centimetre Waves by Rain, Hail and Clouds, Wartime SECRET REPORT sent to Ultra Short Wave Panel, Rep. No. 8516 (Aug. 1944) Rep. No. 8670 (May 1945), The Attenuation and Radar Echoes Produced at Centimetre Wave-Lengths by various Meteorological Phenomena, Physical and Royal Meteorological Societies Report (1947)
- 4) R. W. Wilson: Sun Tracker Measurements of Attenuation by Rain at 16 and 30 GHz, BSTJ, May-June (1969)
- 5) CCIR Doc. (U. K.) IV/245, Use of Frequency Bands Above 10 GHz for Communication-Satellite Systems Measurement of Atmospheric Attenuation and Noise Using a Solar Radiometer, Submitted to the Final Meeting, CCIR, Geneva (1969)
- 6) R. H. Dicke: The Measurements of Thermal Radiation at Microwave Frequencies, The Rev. of Scientific Instruments, 17, 7 (1946)
- 7) J. O. Laws and D. A. Parsons: The Relation of Drop Size

- to Intensity, Trans. Am. Geophys. Union (1943) 452
- 8) CCIR Report, Influence of the Non-ionized Regions of the Atmosphere on the Propagation of Waves, Rep. 234-1, Oslo (1966)
 - CCIR Doc. V/10-E (Mar. 1965) (U. K.), V/101--E (Jan. 1966)
 - 9) C. Hogg, et al.: The Effect of Rain and Water Vapor on Sky Noise at Centimetre Wavelengths, BSTJ, Sept. (1961)
 - 10) J. A. Saxton: Dielectric Dispersion in Pure Polar Liquids at Very High Radio Frequencies, II, Relation of Experimental Results of Theory, Proc. Royal Soc. of London, 213: 1115
 - 11) 森田ほか: 高仰角伝搬における 11 GHz 帯の降雨減衰測定結果, 信学会 IAP 研究会資料 AP 70-3
 - 12) 金原: 10 GHz 帯の高仰角伝搬時の降雨減衰特性, 信学会 AP 研究会資料 AP 68-23 (1968. 6)
 - 13) 小平: 気象レーダの基礎, 気象研究ノート, No. 90 (1967)
 - 14) 金原: 10 GHz 帯高仰角伝搬特性 (2), 信学会 AP 研究会資料 AP 69-21 (1967. 7)
 - 15) A. Kinase and A. Kinpara: Statistics of Attenuation due to Precipitation of Radio Waves in 10 GHz Band at Higher Angle of Elevation, NHK Laboratories Note, No. 130, Aug. (1969)
 - 16) CCIR Doc. (Japan) V/126, IV/316, Tropospheric Absorption and Refraction in Relation to Space Telecommunication Systems Statistics of Attenuation of Radio Waves Frequencies Above About 10 GHz at Higher Angles of Elevation in Japan, submitted to the Final Meeting, CCIR, Geneva (1969)
 - 17) CCIR Doc. (Japan) V/1029, Method for Predicting the Long Term Statistics of Attenuation due to Precipitation of Radio Waves in the 10 GHz Band at Higher Angles of Elevation in Japan.
 - 18) CCIR SG 5, U. K. Contribution, No. 9, A Provisional Method for Estimating Radio and Total Slant Path Attenuation in the Atmosphere for Frequencies Between 4 and 40 GHz. Oct. (1970)

〈付録 1〉 雑音温度の観測方法

ディック形受信機で放電管の雑音を尺度として雑音温度を観測する方法の詳細を次に述べる⁶⁾。

雑音受信時, 雑音放電管点火時, ディック変調停止時に受信される雑音温度をそれぞれ T_{am} , T_{nm} , T_{0m} とする (ディック変調を停止すると常温負荷の雑音温度が受信される)。雑音温度はすべて (°K) とする。

$$T_{am} = T_a \cdot L + T_0(1-L) + T_f \quad (\text{付} \cdot 1)$$

$$T_{nm} = (T_n + T_a) L + T_0(1-L) + T_f \quad (\text{付} \cdot 2)$$

$$T_{0m} = T_0 + T_f \quad (\text{付} \cdot 3)$$

ただし, T_a = 入力回路損失を含めた大気雑音温度

L = ジャイレーター損失

T_f = 受信機内部雑音温度

T_n = 雑音放電管

T_0 = 常温 (回路の温度)

ディック形受信機で雑音温度 T の雑音を受信したときの検波出力 m は $m \propto |T_0 - T|$ となるので, この比例定数を K_m とすると T_{am} , T_{nm} に対する出力 m_a , m_n は,

$$m_n = K_m |T_0 - (T_n + T_a)| \quad (\text{付} \cdot 4)$$

$$m_a = K_m |T_0 - T_a| \quad (\text{付} \cdot 5)$$

上空は気温が低く減衰量は有限なので $T_0 > T_a$ となる。

したがって, 絶対値記号は不要となり図 1 の受信機では

$$T_a = T_0 - \frac{m_a}{m_a - m_n} \cdot T_n = 333 - \frac{m_a}{m_a - m_n} \cdot 160.5 \quad (\text{付} \cdot 6)$$

で雑音温度が得られる。

〈付録 2〉 降雨減衰と大気雑音の関係¹⁾⁻³⁾

電波が雨滴で吸収および散乱されたときに生じる減衰と雑音温度の関係を考える¹²⁾¹⁸⁾。このうち吸収にともなう雑音は抵抗減衰器の場合と同様なので, ここでは散乱について考える。このとき生じる雑音は, 地面から発生する熱雑音が雨滴で散乱されて受信されるものとする。

まず, 受信空中線の真上にある 1 個の雨滴に注目する。この雨滴で散乱された大地からの雑音のうち受信される雑音の割合は付・図 1 で空中線から放射された電力のうち雨滴で大地方向に散乱される割合に相当する。すなわち, 全散乱電力のうち $\theta \leq 90^\circ$ の方向に散乱された成分 P_B である。 $P_B = S_B P_S$ とすると²⁾,

$$S_B = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} S_{RS}(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi \quad (\text{付} \cdot 7)$$

$S_{RS}(\theta, \varphi)$ は雨滴の散乱の境界値から求めた θ, φ 方向への散乱電力の時間平均で, λ, D の関数である (付・図 2)。また, $\pi/2 < \theta < \pi$ の場合を $P_F = S_F P_S$ とすると $0 < \theta < \pi/2$, $\pi/2 < \theta < \pi$ の散乱による減衰定数 α_B, α_F は (4) 式と同様に,

$$\alpha_B = \int_0^\infty N_D Q_S(D) S_B(D) dD \quad (\text{付} \cdot 8)$$

付・図 1

付・図 2

付・図 3 降雨強度と減衰率の関係
Relation between surface rain fall rate and attenuation rate.

$$\alpha_F = \int_0^{\infty} N_D Q_S(D) S_F d(D) D \quad (\text{付} \cdot 9)$$

となる。 $Q_S(D)$ は直径 D の雨滴の等価散乱断面積、 N_D は単位体積中の直径 D の雨滴の粒子数。また、 Q_A

(D) を等価吸収断面積とすると、その減衰定数 α_A は、

$$\alpha_A = \int_0^{\infty} N_D Q_A(D) dD \quad (\text{付} \cdot 10)$$

この N_D は当然降雨強度 R の関数なので、Ryde の R と N_D 分布の観測例を用いて (付・8) ~ (付・10) 式により R ごとの $\alpha_B, \alpha_F, \alpha_A$ を求めると付・図 3 となる。

このようにして求めた $\alpha_A, \alpha_B, \alpha_F$ を用いて (7) 式により計算した結果が図 3 である。

上記の計算に用いた等価断面積は解析結果によると、

$$Q_T(D) = \frac{\lambda^2}{2\pi} \rho^3 (c_1 + c_2 \rho^2 + c_3 \rho^3), \quad \rho \ll 1 \quad (\text{付} \cdot 11)$$

また、 $Q_A(D), Q_S(D)$ はそれぞれ (付・11) 式の実数部と虚数部である。(付・11) 式に用いた ρ, c_1, c_2, c_3 は水の複素誘電率を $\epsilon_1 - j\epsilon_2$ として、

$$\left. \begin{aligned} \rho &= \frac{\pi D}{\lambda}, \quad c_1 = \frac{6\epsilon_2}{(\epsilon_1 + 2)^2 + \epsilon_2^2} \\ c_2 &= \frac{\epsilon_2}{15} \left\{ \frac{3(7\epsilon_1^2 + 4\epsilon_1 - 20 + 7\epsilon_2^2)}{\{(\epsilon_1 + 2)^2 + \epsilon_2^2\}^2} + \frac{25}{(2\epsilon_1 + 3)^2 + 4\epsilon_2^2} + 1 \right\} \\ c_3 &= \frac{4}{3} \frac{(\epsilon_1 - 1)^2(\epsilon_1 + 2)^2 + \epsilon_2^2 \{2(\epsilon_1 - 1)(\epsilon_1 + 2) - 9\} + \epsilon_2^4}{\{(\epsilon_1 + 2)^2 + \epsilon_2^2\}^2} \end{aligned} \right\} \quad (\text{付} \cdot 12)$$

テレビジョン 10 月特集号「画像走査」予定目次

画像走査特集号によせて……………東 大 滝 保 夫
画像工学における走査……………東 大 青木 昌治, NHK 稲津 稔・大石 巖, 電通大 長谷川 伸
電子ビーム走査の問題点

- (1) 概 説……………NHK 高橋 正彦
- (2) 撮像系における走査の問題点……………NHK 高橋 正彦
- (3) テレビ受像系の走査……………日 立 小泉喜八郎・宮崎源太郎
- (4) コンピューターディスプレイ……………東 芝 原尾 紀男・渡辺 一郎
- (5) 電子ビーム録画走査の問題……………NHK 岩村 総一

固体画像装置における走査……………NHK 大石 巖・坂井 徹男・平島 昭男・池田 弘明
光ビーム走査

- (1) 概 説……………東 大 多田 邦雄
- (2) 音響光学的および電気光学的光ビーム走査……………東 大 多田 邦雄
- (3) ホログラフィー技術を用いた光ビーム走査……………慶 大 栗田 正一

走査に関連した最近の話題

- (1) 新しく見出された物性を利用した走査……………日 電 安 藤 隆 男
- (2) 走査速度変換……………NHK 岩村 総一