

Chapter 12: Quantification

リーダーゼミ 2025.1.27

担当：石井

定量化が可能なパラメータ

- Transmitted power (peak and/or average)
- Transmitted frequency
- Wavelength
- Waveguide losses
- Radome losses
- Received power
- Receiver frequency
- Pulse duration and/or pulse length
- Antenna gain
- Antenna beamwidth, both horizontal and vertical
- Antenna beam pattern (beyond the mainlobe)
- Range
- Azimuth
- Elevation angle
- Doppler velocity
- Time

本章のテーマ：

- 仕様書に書かれている値を無批判に信じずに、正確な値を自分で測定する
 - 測定値が正しいか確認する
- 確認・キャリブレーション方法の紹介

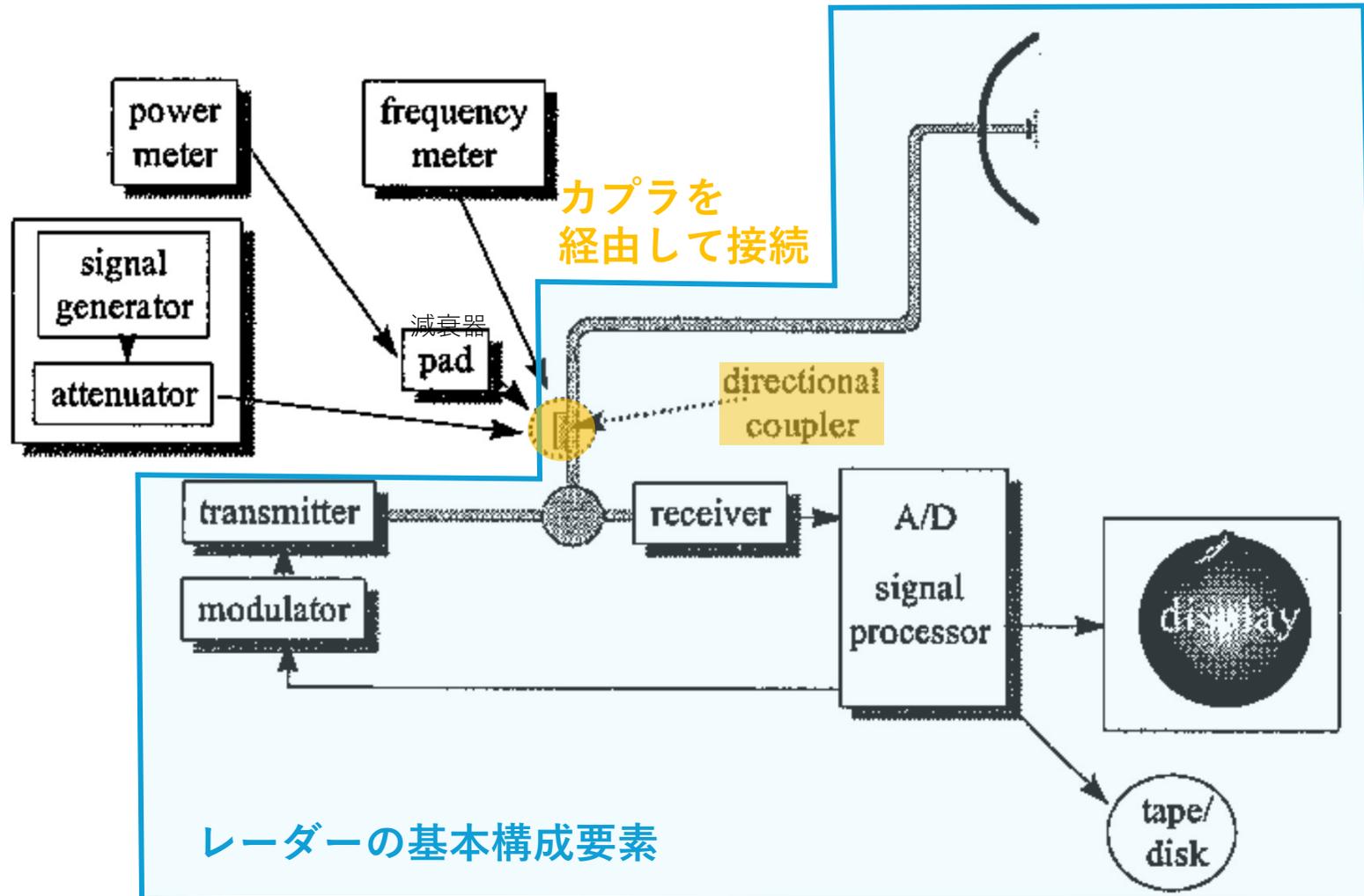


結論：

値のわかっているシグナルや場所のわかっているターゲットを用いて、確認・キャリブレーションを行うことが重要

パラメータ測定のために…

- Directional couplers (指向性結合器・カプラ)



- ✓ レーダー内部の導波管には一般的に外部接続できない
→ **カプラ経由**で測定装置を接続
- ✓ 導波管から少量のエネルギーを接続した装置へ分岐させる
… 全体の1/1000以下
(損失係数 35 dB程度)

Transmitter Power 送信電力

- パワーメーターでカプラにおける電力を計測
 … 単位 mW or dBm ※ dBm = $10\log_{10} P$ (mW)

→測定回路や測定以降の回路での損失を考慮して、**送信電力**を得る

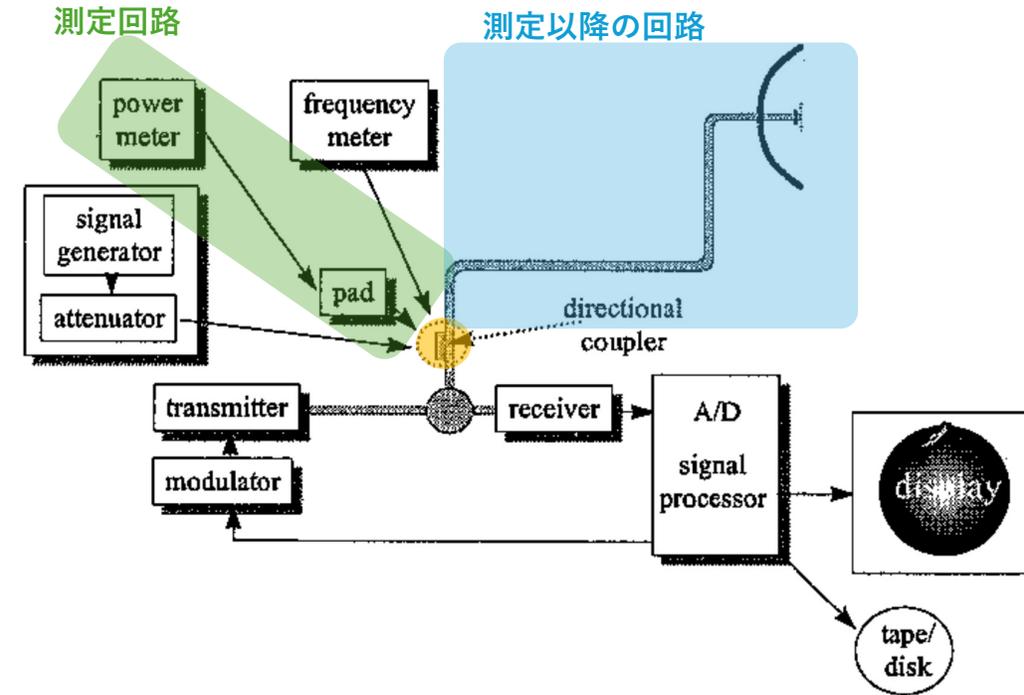
$$P_t = P'_t + L_d + L_c - L_p - L_w - L_r$$

送信電力
(dBm)

カプラでの
電力
(dBm)

カプラ ケーブル
測定回路での
損失(dB)

pad 導波管 radome
測定以降、照射までの
損失(dB)

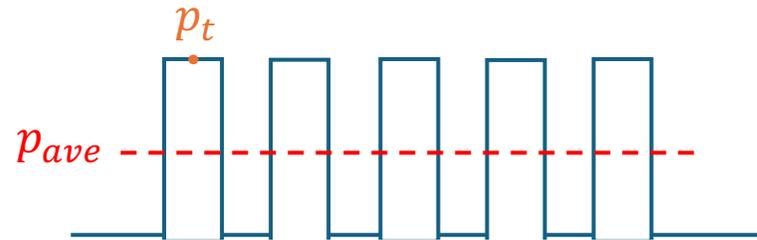


送信電力の測定

- カプラやpad(減衰器)のそばのケーブルの端に**サーミスタ**をつけることで電力を測る
 - サーミスタ：温度変化に応じて抵抗が変化
 - 電力消費による温度上昇を測定し、**電力（実効値）**を推定
 - … 非常に短い時間でパルス照射 ↔ サーミスタは急に温度変化しない

実効値
(測定) 最大值

$$p_{ave} = p_t f$$



$$f = \tau PRF$$

f : Duty cycle ... パルスがonになる時間の比率
 τ : パルス継続時間
 PRF : 1秒あたりのパルス回数

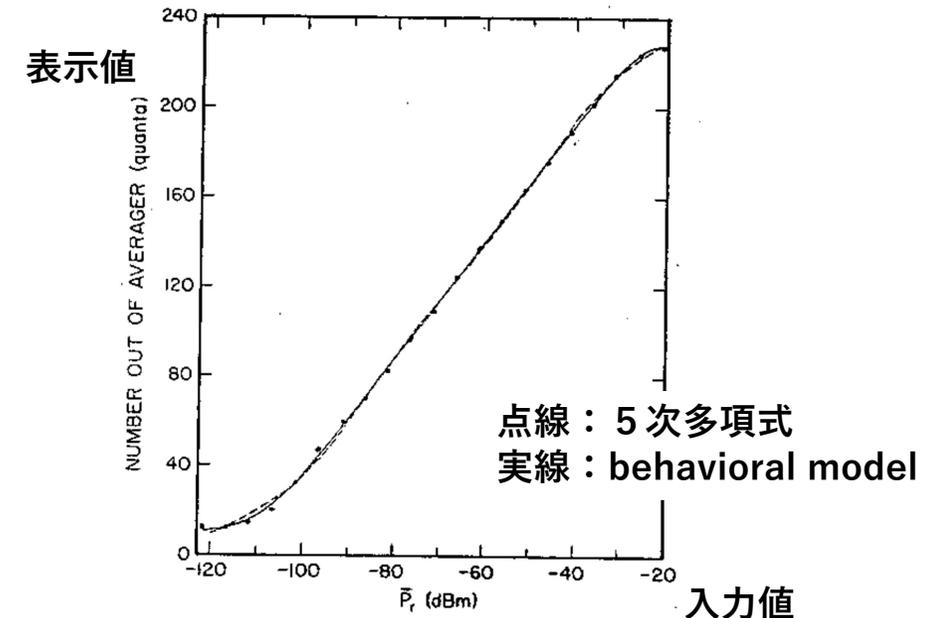
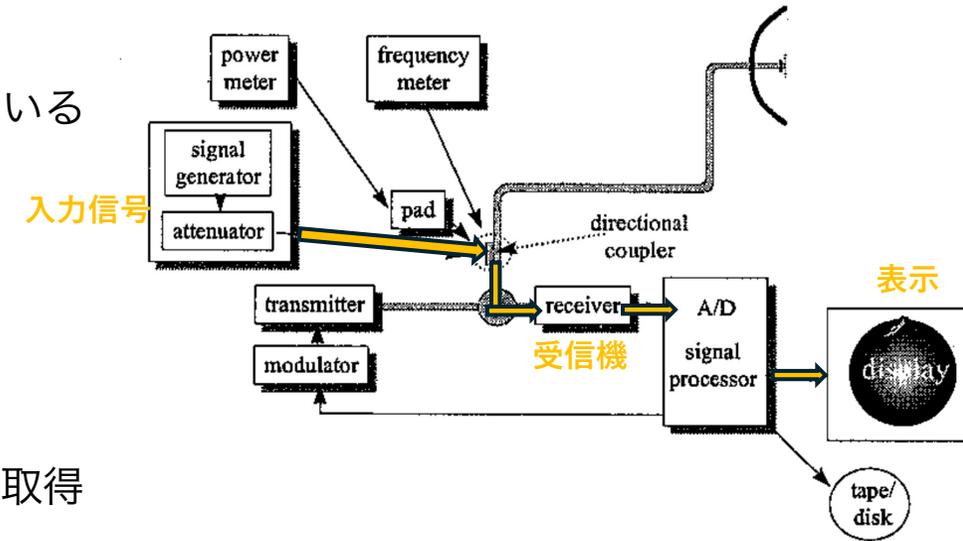
- 一般的な送信電力 p_t ... 数kW~2MW (60dBm~90dBm)
- 平均電力 p_{ave} ... p_t より30 dB程度小さい
- 測定誤差 ... 0.5~1 dB

Transmitter Frequency 送信周波数

- カプラに周波数計を接続する
- 送信周波数はレーダー方程式で扱う変数の中で最も正確に測定できる
 - … 電力計でMHzまで測定可能
 - 例：C-band 5500 MHz → 測定誤差1 MHz(=0.02%, 0.08dB)
- 光速を用いて波長も高精度に得られる ($\lambda = c/f$)

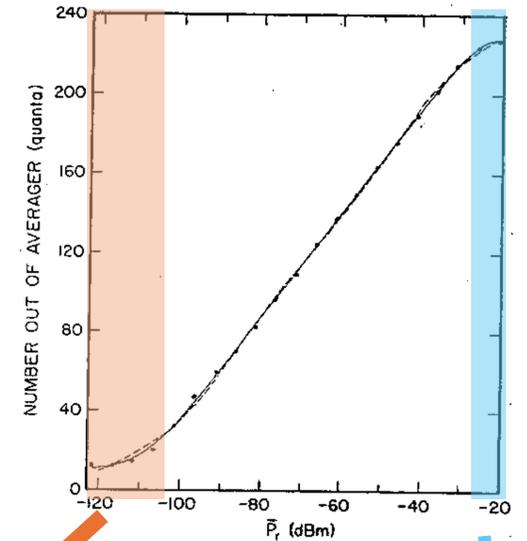
Received power 受信電力

- 受信機のキャリブレーションが必要
→ Transmitterはオフにして、Signal generatorから大きさのわかっている信号を入力
- 受信信号はA-Dコンバータでデジタル値に変換
 - 分解能 8~10 bit ($=2^8\sim 2^{10}$)
 - ダイナミックレンジ 80~90 dB
(最小値: -120~-100 dBm, 最大値: -30 dBm)
→ 1ステップずつ信号の強さを変えて、入力信号と表示値の関係を取得
(線形でないため全ステップやる)
- あるいは 1 dB(or 5dB)ずつ入力信号を変化させて、その間を何らかの関数で内挿
 - 多項式
 - 2点間を線形補完
 - Behavioral model



Behavioral model (Pike & Rinehart, 1983)

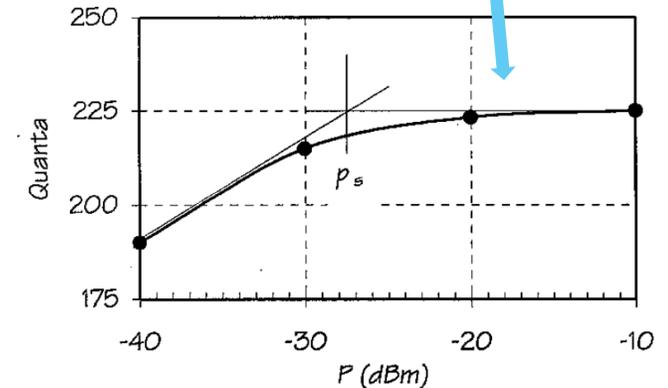
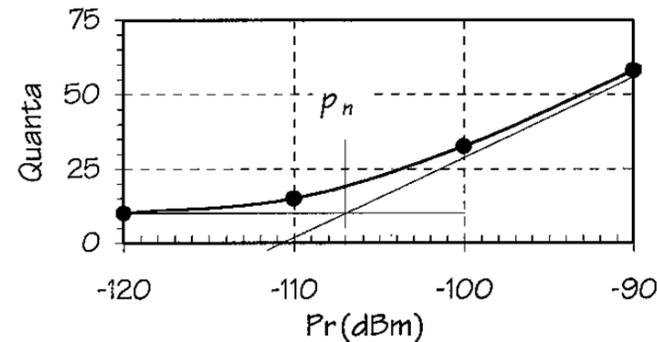
- 受信機の物理を反映
 - 最小値付近 … シグナル+ (レーダー自身による) ノイズ $p_r + p_n$
 - 最大値付近 … 徐々に一定値になる $\frac{p_s}{p_r + p_s}$ 飽和電力
- 中間部 … 対数表示で直線



$$10 \log_{10} \left(\underbrace{(p_r + p_n)}_{\text{X軸}} \underbrace{\left(\frac{p_s}{p_r + p_s} \right)}_{\text{Y軸}} \right) = a_0 + a_1 q$$

※ $10 \log_{10} p_r$

- p_s, p_n の求め方
 - 実際に測る
 - キャリブレーションデータのfittingからも求められる



- 中間部が完全に直線にならない場合は、多項式を採用 (右辺)
- 求められた p_r からレーダー反射因子を算出

$$Z_e = P_r + 20 \log r + C$$

Receiver bandwidth 受信周波数幅

- 実測するのはアマチュア向きではない … メーカー公表値を信用する
- Bandwidthと名の付くものには、いくつかの種類があるので気をつけて使う
 - Noise bandwidth
 - Receiver filter bandwidth … 減衰が最大値の4分の1である周波数の範囲
- 太陽光を使ったアンテナゲインの計測時に使用（後述）

Pulse duration パルス継続時間

- オシロスコープを繋いで計測（カプラ経由）



- 地表ターゲットのエコーからもわかる
 - 周りに他の反射体がなく、波長より小さな反射体 → 反射波が入射波と鏡像になる
 - レシーバーが急速に変化するシグナルにうまく反応しないので、照射波と完全に同じシグナルは得られない
 - 反射波の方が波長が長くなる傾向(例： $0.6\mu\text{s} \rightarrow 1\mu\text{s}$)

Antenna gain アンテナゲイン

$$\text{レーダー方程式 (Point target)} \quad p_r = \frac{p_t g^2 \lambda^2 \sigma}{64\pi^3 r^4}$$

- ゲイン：等方放射体に対する指向性アンテナの伝送・受信効率。アンテナのサイズと形状、波長に依存
- 測定するのは導波管での減衰を含んだゲイン → 時々測定することで導波管の不備の発見にもつながる

ゲインの取得方法

(1)工場出荷時の値を使う… 理論値を引用している場合があるため注意
ゲイン g はレーダー方程式で2乗の形で出てくる（誤差の大きさも2乗）

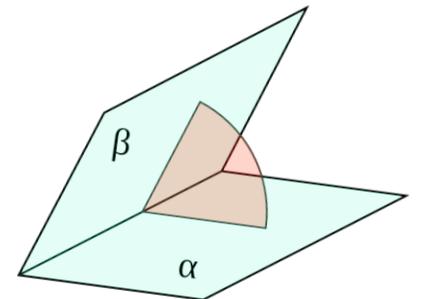
(2)Antenna rangeを用いた測定… デメリット：アンテナの移動が必要
（費用・時間がかかる、運用時と完全に同じセッティングでない）

(3)Signal generatorを使う… やや離れた場所から値のわかっているシグナルを照射。
Point targetの**レーダー方程式**の修正版を用いてゲインを算出。

(4)Standard targetを用いる… 後方散乱断面積、送信電力、受信電力、ターゲットまでの距離を用いて
レーダー方程式からゲインを求める

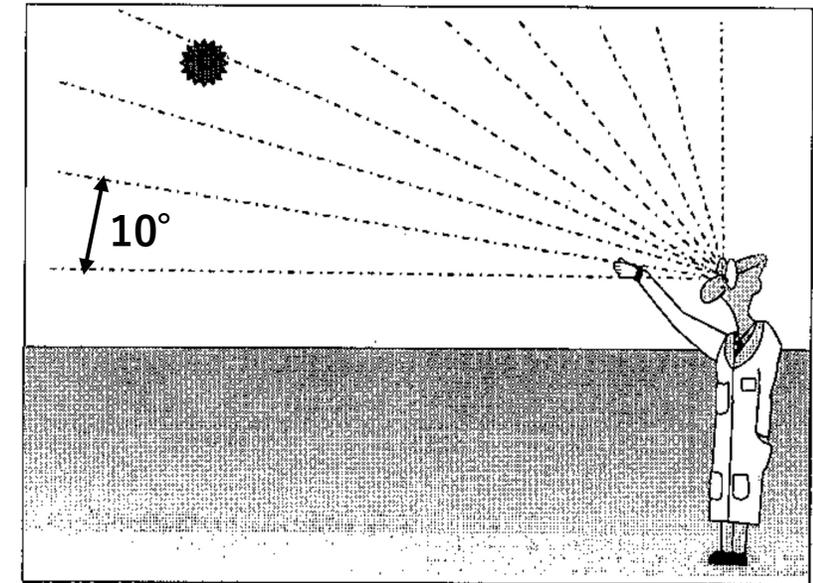
Standard target：直径10-30 cmの鉄球（風船にぶら下げて飛ばすorある場所に固定される）
dihedralターゲット（ポールの上に取り付けられる）

(5)太陽を用いる… 太陽から得られる電力を用いて**レーダー方程式**からゲインを求める



太陽を用いたAntenna gainの測定

- 太陽光は幅広い周波数の電磁波を含む（十分にレーダーで検知できる大きさ）
→ 太陽光を**大きさ・放射位置**がわかっているシグナルとして利用する
- 太陽からの**電力値**… **Solar flux**：様々な観測所が日々、周波数ごとの値を測定している
特定の周波数のSolar flux densityから推定も可能（∵ Solar flux densityは周波数に比例）
よく用いられる周波数：2800 MHz (F10.7) … 黒点の数と相関
- 太陽の**位置** …
 - ✓ エフェメリス、アルマナック（軌道情報）を使う
 - ✓ 網羅的にスキャンして最もシグナルが強くなる方位角、仰角を探す
 - ✓ "rule of fist"(拳法) … 拳の下を通る視線を水平線に沿わせる＝仰角0度
太陽まで拳何個分か
(拳1個あたり10度、指1本で2度)
 - ✓ 観測点の緯度経度と日時から計算で求める ※次スライド



緯度経度・日時を用いた太陽位置の計算方法

- アルマナックの値ほどは正確でない
 “The American Ephemeris and Nautical almanac” (合衆国政府印刷局毎年刊行)
 USNO(アメリカ海軍天文台)天文応用部作成の計算プログラム
 “NOAA(アメリカ海洋大気庁) Solar Ephemeris Program”

- 太陽の赤緯(Declination)

$$\delta = -23.5^\circ \cos\left(\left(\frac{D}{\text{日}} + 10.3\right) \frac{360^\circ}{365.25}\right)$$

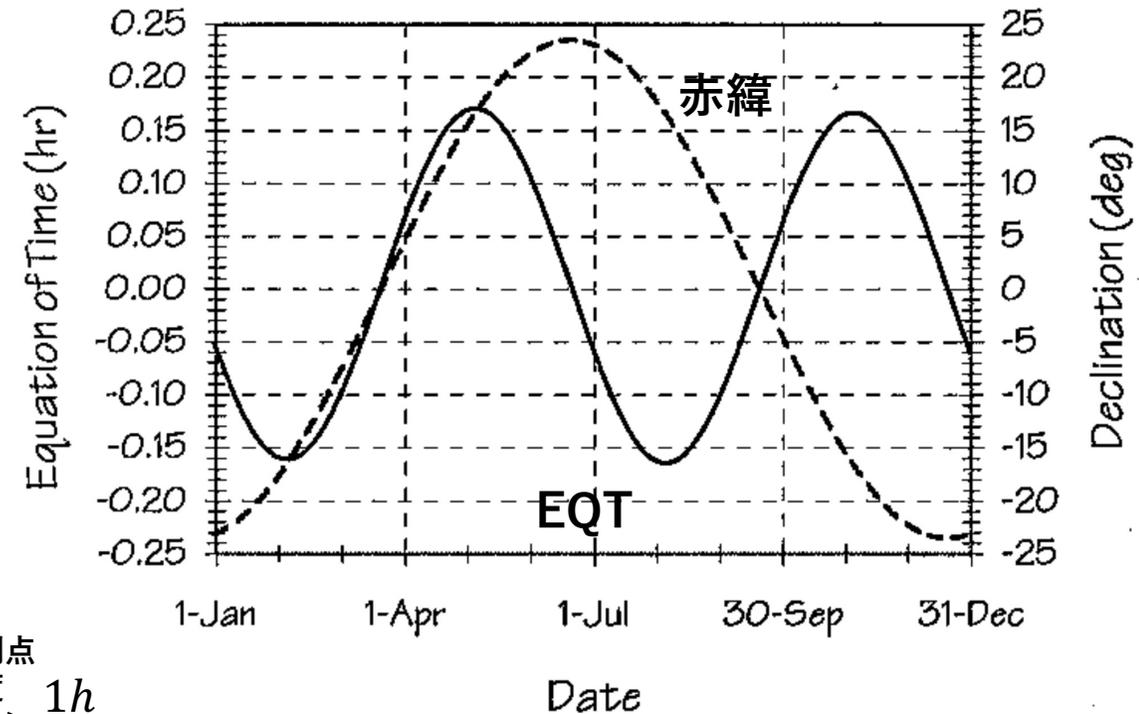
※閏年を考慮していないので
精度が悪くなる

- 時刻情報：地球の公転速度は楕円軌道上の場所によって変動
 → 太陽時間は日によって変動
 → 時刻の修正が必要”Equation of time”
 = 太陽時間の時計時間とのずれ

$$EQT = 0.123 \cos(time + 87^\circ) - \frac{1}{6} \sin\left(\frac{time + 10^\circ}{0.5}\right)$$

※ $time$ は度数表示の日付 $time = D \frac{360^\circ}{365.25}$

- 観測点経度によっても太陽時刻は変わる
 (標準時決定経度と観測位置経度の差を考慮) $\delta t_\lambda = (\lambda_{std} - \lambda) \frac{1h}{15^\circ}$



緯度経度・日時を用いた太陽位置の計算方法 (続き)

- これまでの補正を全て足し合わせて角度に変換 (Local Hour Angle)

$$LHA = (\text{local clock time} + \delta t_{\lambda} + EQT + 12h) \frac{360^{\circ}}{24 h} \quad \text{※正午が0度}$$

- 太陽のazimuthとelevation angle (地平線からの角度)

$$x = \tan Az = \frac{\sin LHA}{\cos LHA \sin \phi - \tan \delta \cos \phi}$$

ϕ : レーダー位置の経度

δ : 太陽の赤緯

z : 太陽の天頂からの角度

$$\sin el = \cos z = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos LHA$$

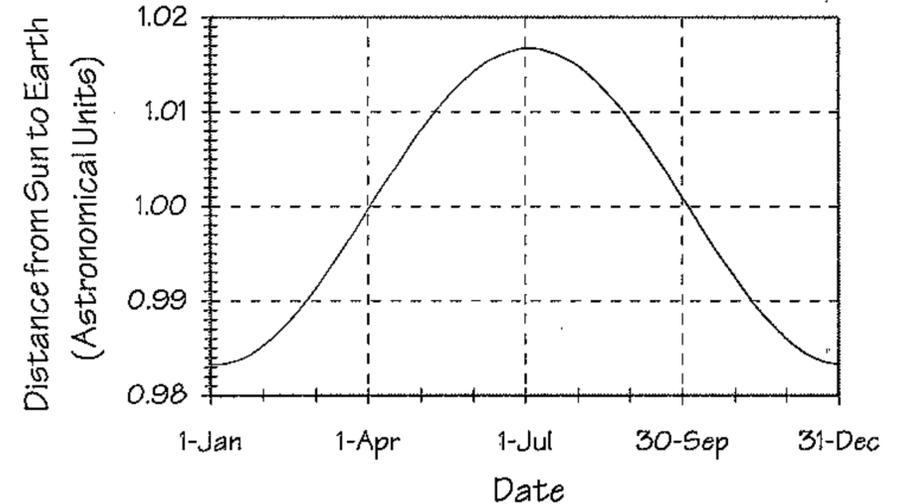
- ✓ これらの式自体は前述のプログラムと同じ
 - 最終結果の精度の違いは、赤緯や時刻の近似式の精度に依存
- ✓ 太陽光の屈折は考慮していない
 - 仰角が小さい時は誤差が生じやすい

太陽を用いたAntenna gainの推定 (Whiton et al., 1976; Frush 1984)

太陽光による受信電力を測定し、レーダー方程式からゲインを算出する

注意事項

- レーダーでは一つの偏波成分しか検知できない ↔ 自然光は偏波していない
→ 受信電力を2倍にする
- 距離補正：公表されているSolar fluxの値は1天文単位の距離で規格化されているもの
→ 距離に応じて補正する
※地球の公転軌道は楕円のため、時期によって太陽と地球の距離が変わる



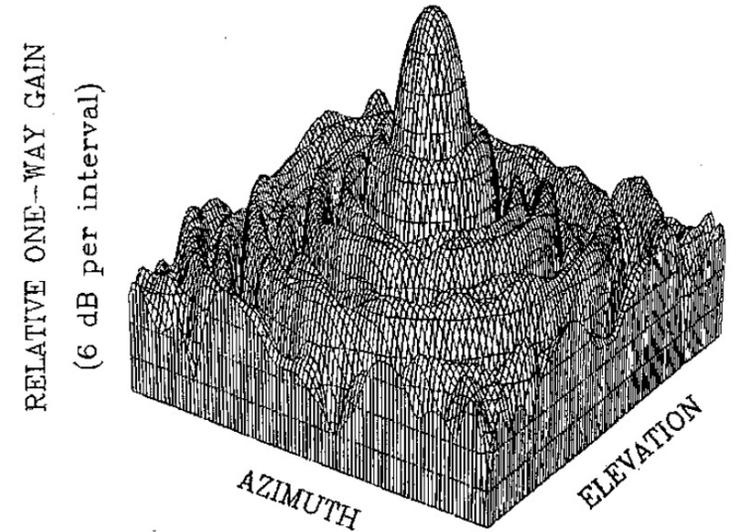
- 太陽は点ターゲットでもbeam-fillingターゲットでもない…Frush(1984)の補正項を使う
- 大気減衰の追加…観測所の発表値は大気減衰を取り除いている

Antenna beam pattern ビームパターン

- アンテナゲインの測定と本質的には変わらない
 - 異なるのは、アンテナで方位角方向・仰角方向に網羅的にスキャンすること
 - スキャン過程で得られた記録から完全なビームパターンを得る
- **Signal generator**か**Standard target**を用いる
 - 動くターゲットは適さない
 - 相対観測
 - 後方散乱断面積がわからなくても良い
- **地表ターゲット**を用いる方法 (Rinehart & Frush, 1983)
 - 強いエコーを出すターゲットを選ぶ
 - できるだけアンテナを下げて (地表ターゲットの 10° 程度上) 方位角方向にゆっくりスキャン
 - 十分ゆっくりであれば 0.1° 程度の解像度で得られる
 - 終わったら仰角を $0.1-0.2^\circ$ あげて繰り返す
- 照射電力の時間変化や鳥・虫の混入等を補正

Antenna beamwidth ビーム幅

- メインローブにおいてゲインが最大値の半分 (-3dB) より大きくなる範囲の角度



Range 距離

- 場所のわかっている地表ターゲットの距離を測定して、誤差を確認
 - 地図上で距離と方位を読み取り
 - 緯度経度から距離を計算

$$R = \cos^{-1}(\sin \phi_r \sin \phi_t + \cos \phi_r \cos \phi_t \cos(\lambda_t - \lambda_r))F$$

$$F = \frac{C}{360^\circ}$$

$$C = 2\pi R_e$$

地球半径
(緯度依存)

$$\Theta = \cos^{-1} \left(\frac{\sin \phi_t - \cos \left(\frac{R}{F} \right) \sin \phi_r}{\sin \left(\frac{R}{F} \right) \cos \phi_r} \right)$$

ϕ : 緯度
 λ : 経度

- 光速の取り扱い
 - 遠方の距離を正確に測る必要がある場合、光速の値は近似値でなく厳密な値を使う
例：150 km…近似値だと100 mの誤差
 - 大気中での光速の減衰を考慮しないと数十mの誤差（普通は無視する）
- GPSの使用

Azimuth and elevation angles 方位角と仰角

場所のわかっているターゲットを測定して、誤差を確認

- 太陽を使う
 - 仰角チェックに適する
 - 場所が変わるので多方向のチェックが可能
- 地表ターゲットを使う
 - 地表付近($<10^\circ$)での屈折があるため、仰角チェックは太陽のほうがいい
- 水準器でアンテナ台座の水平確認・実角度と表示角度の一致も確認しておく

Doppler velocity ドップラー速度

- 境界層における測定速度と風速計の値を比較
→ 大きな差がなければ正しいと判断して良い

再掲：定量化が可能なパラメータ

- Transmitted power (peak and/or average)
- Transmitted frequency
- Wavelength
- Waveguide losses
- Radome losses
- Received power
- Receiver frequency
- Pulse duration and/or pulse length
- Antenna gain
- Antenna beamwidth, both horizontal and vertical
- Antenna beam pattern (beyond the mainlobe)
- Range
- Azimuth
- Elevation angle
- Doppler velocity
- Time

本章のテーマ：

- 仕様書に書かれている値を無批判に信じずに、正確な値を自分で測定する
 - 測定値が正しいか確認する
- 確認・キャリブレーション方法の紹介



結論：

値のわかっているシグナルや場所のわかっているターゲットを用いて、確認・キャリブレーションを行うことが重要