

アンテナ指向誤差の数値モデルと補正 武安義幸 / JA6XKQ

アンテナ・マウントの不完全性に起因するアンテナ指向誤差を物理的要因を基に数値モデル化(多項式近似)し、校正データをフィッティングすることで物理的要因毎の係数を求めた。数値モデルによる補正を行うことで、校正データを取得した方位/仰角以外の任意の方向へ最小平均誤差でアンテナを指向させることが可能となる。

はじめに

無線通信全般の基本的な要件として、“いつ(時刻)” “如何なる方向から(方位/仰角)” “どの周波数で” 電波が到来するのが判っていなければ、信号を捉えることはできない。時計を見て、アンテナ・コントローラでアンテナの方位と仰角を設定し、受信機のチューニング・ダイヤルを回す訳で、この日常的なオペレーションを大仰に言うまでもない。衛星通信や月面反射通信(EME)であれば、トラッキング・ソフトウェアを用いて “時刻” “方位/仰角” “周波数” を計算し、各機器を設定する。“時刻” と “周波数” については GPS を用いた時刻/周波数同期が普及しており、機器の校正と精度が信号捕捉で問題となることは稀であろう。一方、アンテナの “方位/仰角” 指向については、アンテナを設置したままの角度校正無しでは、衛星通信や EME においては通信の可否に関わってくる重要なポイントである。微弱信号を相手とする衛星通信や EME では高利得なアンテナ、つまり、輻射指向特性(いわゆるビーム)が鋭いアンテナを必要とするので、アンテナ・マウントの指向誤差(Pointing Error)を把握して補正する校正が必須である。

深宇宙(Deep Space)探査機からの信号を捉える実験 [1] では、アンテナ・マウントの指向誤差の校正に課題を残した。指向誤差の校正について検討しているさなか、JA-EME のメーリングリストにて JJ1NNJ 関 OM の「アンテナ仰角により AZ のずれが変化する奇怪な現象」という投稿を読み、アマチュアにとって大型なアンテナを使う際の共通な課題であることを認識した次第である。

アンテナ指向誤差の校正方法として、トラッキング・ソフトウェアの計算値を基に信号が最強となる方位/仰角へ手動で微調整し、その調整量をテーブル化してトラッキング・ソフトウェアに取り込むことが [2]、アマチュアでは従来から行われている。JJ1NNJ 関 OM もこの手法を用いて校正された結果での投稿であった。一方、プロフェッショナルな電波望遠鏡や光学望遠鏡 [3] [4] [5] [6]、あるいは一部のアマチュアの光学望遠鏡では [7] [8]

[9]、アンテナ/望遠鏡マウントの指向誤差を数値モデル化し、その数値モデルに基づいて指向誤差を最小化する手法が用いられている。

本稿は文献 [4] と [5] に示されているアンテナ指向誤差の数値モデル化手法を用いて JJ1NNJ 関 OM 取得の校正データを処理し、数値モデル化手法の有効性を体験することを目的とする。理論的な解説は各参考文献に委ね、本稿ではデータの処理過程と結果のみを記述する。なお、文献 [4] は同じ著者による文献 [3] から派生したものであるが、文献 [3] が入手できないので、理論的背景の完全な理解には至っていない。

必要な指向精度

アンテナの指向精度が通信の可否に関わる重要なポイントだとすれば、如何ほどの指向精度を必要とするであろうか？ まず、必要な指向精度を明らかにして、アンテナ指向誤差の数値モデルと補正の目標値としたい。

パラボラ・アンテナの輻射指向特性は電力半値角度 (HPBW = Half Power Beam Width)

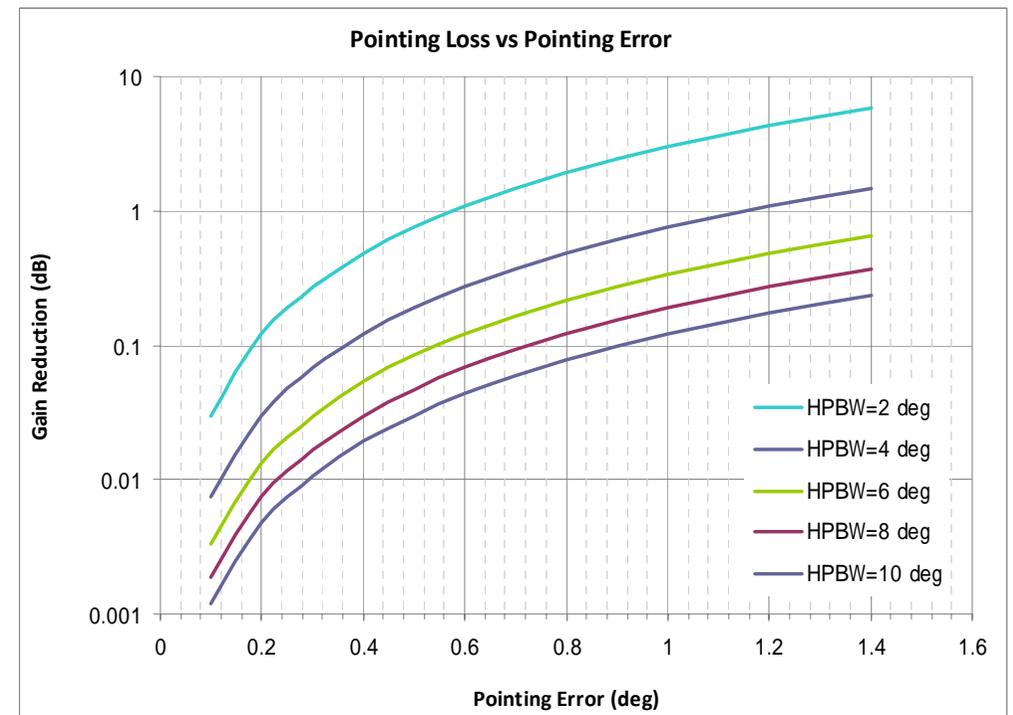


図-1 : アンテナ指向誤差と利得低下の関係

で正規化するとその形状は相似形であり、アンテナ指向誤差と利得低下の関係は次式で近似できる【10】。その近似式を、HPBW が 2 ~ 10 度のパラボラ・アンテナについて 図-1 にプロットする。

$$\Delta G(\theta) = 10 \log_{10} \left(e^{\frac{2.773\theta^2}{HPBW^2}} \right) \quad (dB) \quad \dots \quad (1)$$

ここで、
 = Pointing Error (deg.)
 HPBW = Half-Power Beamwidth (deg.)
 である。

信号強度の分解能を 0.1 dB だとすると、つまり、信号がノイズ・フロアから 0.1 dB 浮かび上がれば信号の存在が判るとすると、HPBW の 10 % のアンテナ指向誤差が許容できることが 図-1 から読み取れる。JJ1NNJ 関 OM の 3m アンテナは、2.4 GHz 帯において約 3 度の HPBW とのことなので、0.3 度以下の指向誤差が目標となる。

アンテナ指向誤差の発生要因

文献【4】では、AZ (Azimuth) / EL (Elevation) 型マウントの指向誤差の物理的な要因として、表-1 に示す 9 項目を挙げている。ここで、“物理的な要因”とことわっている理由は、数値モデル化手法には文献【11】で引用されているような物理的要因とは無関係に球面調和関数 (Spherical Harmonics) による多項式を用いて、測定した校正データをフィッティングする手法があるためである。物理的な要因による誤差具合が解れば、例えば、AZ 軸が垂直ではなく傾いていることが判明する等、場合によってはアンテナ設置後にも改善できる可能性があること、また、軸受け等の摩耗部品の保守の観点からも物理的な要因に基づいて指向誤差を数値モデル化する意義は大きい。なお、文献【4】は光学望遠鏡を主題としているので、表-1 での表現は本稿の主題であるアンテナに合わせた用語とした。

文献【5】では、文献【3】を基に誤差要因を表-2 に示す 23 項まで拡張した数値モデルを使用している。本稿では、表-1 と表-2 の数値モデルを JJ1NNJ 関 OM の校正データに適用して、その違いを確認する。

文献【4】【5】ともに、三角関数での微小角近似、すなわち、 $\sin \theta \approx \theta$ と $\cos \theta \approx 1$ を用いており、その結果、後述するような多項式でアンテナ指向誤差を表している。ここで三角関数の微小角近似を用いずに厳密解を得ようとすると単純な多項式とはならず、解法が

複雑化する。解法を単純化するための工学的な常套手段であるが、初見では計算式のトレースに時間を要した。

アンテナ仰角により AZ のずれが変化する奇怪な現象

「アンテナ仰角により AZ のずれが変化する奇怪な現象」なる投稿を読んで “延髄反応” で返信したのは、2009 年に JA4BLC 又賀 OM の事例で解析済みであったことが背景にある。JA4BLC 又賀 OM の事例は、「フィード変位によりビームがずれるので、方位/仰角を補正するが、方位の補正量が方位角により変わり、南中前後が大きく、しかも月赤緯により変わる」というもので、両事例ともに表-1 と表-2 にあるコリメーション・エラーに起因する。

コリメーション・エラー、つまり、マウントの機構的な指向軸 (EL 軸と直交) とアンテナ・ビームとのずれは、式-(2) および 式-(7) に “sec E” と示されているように仰角に依存している。これを、仰角に関わらず一定だと勘違いするのは、アンテナ・ビームについては (,) を用いた球面座標系 (Spherical Coordinate System) であることに対し、AZ/EL マウントは地平座標系 (Horizontal Coordinate System) であり、両者間の変換を見落としていることに起因していないだろうか？ コリメーション・エラーが仰角に依存することの導出は、文献【6】が参考となる。AZ/EL 角度を地球の緯度/経度に置き換えて簡単な例えで説明すると、完全な球体と仮定した地球の赤道上で東経 0 度から東へ約 1,112 km 移

| Error 誤差要因 | AZ 係数 | EL 係数 |
|-------------------------------------|-------|-------|
| Collimation 機構的指向とビームのずれ | | - |
| Non-perpendicularity AZ/EL 軸間の非直交性 | | - |
| EL bearing (sin term) 軸受け歪み (sin 項) | B1 | - |
| EL bearing (cos term) 軸受け歪み (cos 項) | B2 | - |
| AZ bearing (NS term) 軸受け歪み (南北方向) | B3 | B3 |
| AZ bearing (EW term) 軸受け歪み (東西方向) | B4 | B4 |
| Tilt toward north AZ 軸傾き (北方向) | X | X |
| Tilt toward east AZ 軸傾き (東方向) | Y | Y |
| Flexure フィードのたわみ | - | T |

表-1 : “数値モデル-1” の誤差要因と係数

| Error 誤差要因 | AZ 係数 | EL 係数 |
|---|-----------------|-----------------|
| AZ encoder offset AZ エンコーダ オフセット | C ₁ | - |
| EL encoder offset EL エンコーダ オフセット | - | C ₂ |
| AZ axis tilt about North AZ 軸傾き (北方向) | C ₃ | C ₃ |
| AZ axis tilt about East AZ 軸傾き (北方向) | C ₄ | C ₄ |
| Collimation 機構的指向とビームのずれ | C ₅ | - |
| Non-orthogonality AZ/EL 軸間の非直交性 | C ₆ | - |
| AZ bearing ellipticity (sin) 軸受け歪み (sin) | C ₇ | - |
| AZ bearing ellipticity (cos) 軸受け歪み (cos) | C ₈ | - |
| EL bearing ellipticity (sin) 軸受け歪み (sin) | - | C ₉ |
| EL bearing ellipticity (cos) 軸受け歪み (cos) | - | C ₁₀ |
| Flexure フィードのたわみ | - | C ₁₁ |
| AZ encoder scale AZ エンコーダ スケール | C ₁₂ | - |
| EL encoder scale EL エンコーダ スケール | - | C ₁₃ |
| Bi-periodic in AZ (sin2A) 2倍 ハーモニック 成分 | C ₁₄ | - |
| Bi-periodic in AZ (cos2A) 2倍 ハーモニック 成分 | C ₁₅ | - |
| EL encoder stiction (sin) エンコーダ摩擦 (sin) | - | C ₁₆ |
| EL encoder stiction (cos) エンコーダ摩擦 (cos) | - | C ₁₇ |
| EL bearing stiction (sin) 軸受け摩擦 (sin) | - | C ₁₈ |
| EL bearing stiction (cos) 軸受け摩擦 (cos) | - | C ₁₉ |
| Scaled bi-periodic in AZ (sin) EL 依存 ハーモニック | C ₂₀ | - |
| Scaled bi-periodic in AZ (cos) EL 依存 ハーモニック | C ₂₁ | - |
| Bi-periodic in EL (sin) 2倍 ハーモニック 成分 | - | C ₂₂ |
| Bi-periodic in EL (cos) 2倍 ハーモニック 成分 | - | C ₂₃ |

表-2 : “数値モデル-2” の誤差要因と係数

動(ビームのずれに相当)した地点は東経 10 度であるが, 東経 0 度のグリニッジから同じ北緯 51 度上を 1,112km 移動しても, そこは東経 10 度ではなく東経 16 度である。

JA4BLC 又賀 OM の測定データと $1/\cos E$ による数値モデルの計算値を, 図-2 に示す。測定データと数値モデルの良い一致が見て取れる。ここから得られた結論は, 「フィードの変位が一定ではなく, 仰角とともに 3.5 度 2.7 度 3.1 度と変化する」というものであった。このように物理的要因を基に指向誤差を数値モデル化すれば, 改善個所の特定が可能となる事例であった。

一方, JJ1NNJ 関 OM の校正データが, コリメーション・エラーだけでは説明できない指向誤差を含んでいる可能性を示唆しているので, 後述の処理を行う次第である。

数値モデル 1

表-1 に従ってアンテナ指向誤差を数値モデル化し, 校正データのフィッティングを行う。AZ と EL の指向誤差 P_A と P_E は次式となる。

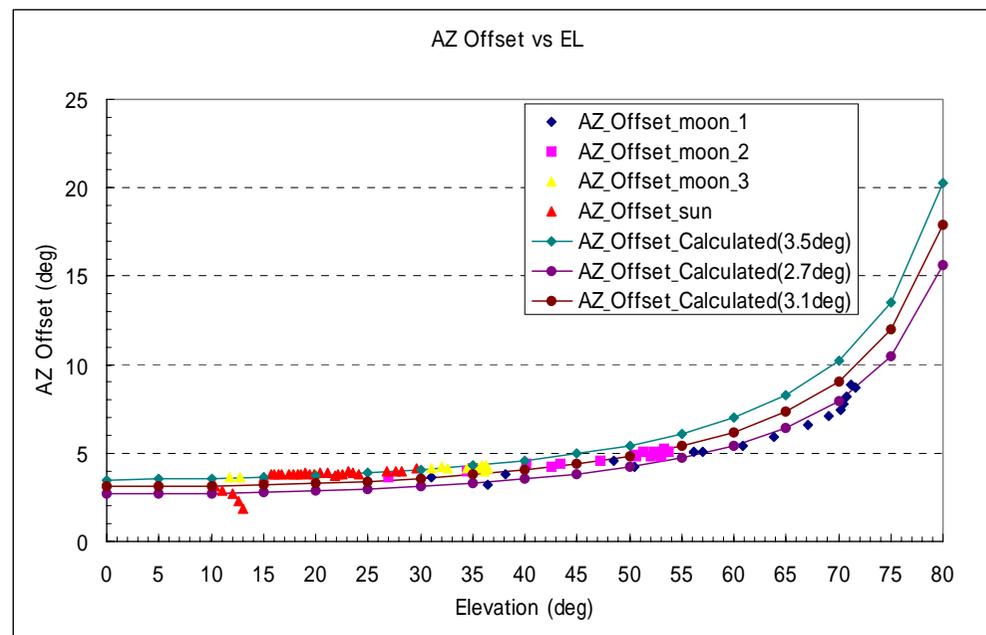


図-2 : 機構的指向とビームのずれ

$$\begin{aligned} \Delta P_A = & -\gamma \sec E + \eta \tan E + \xi_{B1} \sin E + \xi_{B2} \cos E \\ & + \xi_{B3} \cos A \sin A \tan E + \xi_{B4} \cos A \cos A \tan E \\ & + \psi_X \sin A \tan E + \psi_Y \cos A \tan E \quad \dots \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta P_E = & \xi_{B3} \sin A \cos A + \xi_{B4} \cos A \cos A \\ & + \psi_X \cos A + \psi_Y \sin A - \delta_T \cot E \quad \dots \quad (3) \end{aligned}$$

ここで、 A と E はAZとELの真値(トラッキング・ソフトウェアの計算値,単位はラジアン)である。アンテナ・コントローラの制御値,つまり角度エンコーダの読値 A_{ENC} と E_{ENC} はそれぞれ,

$$A_{ENC} = A + \Delta P_A \quad \dots \quad (4)$$

$$E_{ENC} = E + \Delta P_E \quad \dots \quad (5)$$

となる。

校正データの例を添付のExcelスプレッドシートの“Model-1”シートに示す。この校正データは、JJ1NNJ 関OM が2020年6月25日から27日の三日間にわたって、トラッキング・ソフトウェアの太陽位置AZ/EL計算値(以降,“真値”と称する)を基にして、太陽雑音(Sun Noise)の最大信号強度が得られるように手でAZ/EL角度を調整して記録されたデータ(以降,“測定値”と称する)である。スプレッドシートではAZ真値の昇順で表の行を並び替えているが、以降の処理において並び替えは必須ではない。また、前後の値から記録間違いと思われる例外値は削除している。

表-1による上記の**式-(2)**と**式-(3)**の係数をスプレッドシートのセルグループ(B2:J2)に列挙している。後述のフィッティングを行う前の段階では、各係数には仮の初期値を入力しておく。列Qと列Wは、**式-(2)**と**式-(3)**を用いて真値に対する指向誤差を計算している。列Xと列Zは、真値と指向誤差を足したエンコーダ読値(以降,“目標値”と称する)である。

フィッティングは、目標値と測定値の差異が最小となる係数を求めることである。そこで、**式-(6)**を用いて目標値と測定値の差異とし、更に、測定データ全体での平均値が最小となる係数を求めた。スプレッドシートの列ADが差異を示し、セルAD134が平均値を示している。

$$\sqrt{AZ(\text{測定値}-\text{目標値})^2 + EL(\text{測定値}-\text{目標値})^2} \quad \dots \quad (6)$$

9個の係数を調整して“目標値と測定値の差異の平均値”を最小とする処理は、Excelスプレッドシートが備える“ソルバー”を用いる。引用している参考文献では、この最小化処理の手法を各種論じているが、ここでは既存の簡便な手法を用いた。その手順は、Excelの“ツール”メニューから“ソルバー”を選択し、“パラメータ設定”の“目的セル”に上述のセルAD134を指定する。そして、“目標値”の三択では“最小値”を選択する。最後に、“変化させるセル”には9個の係数が入力されているセルグループ(B2:J2)を指定して、“実行”する。

実行の結果、セルAD134を最小とする9個の係数がセルグループ(B2:J2)に示されている。フィッティングの残差は0.34度であり、当初に設定した指向誤差の目標値0.3度をわずかに上回る結果となった。フィッティングの結果を**表-3**に示す。

数値モデル 2

次に、23個の係数を使う**表-2**に従ってアンテナ指向誤差を数値モデル化し、校正データのフィッティングを行う。AZの指向誤差 A とELの指向誤差 E は次式となる。

$$\begin{aligned} \delta A = & c_1 - c_3 \cos A \tan E - c_4 \sin A \tan E + c_5 \sec E \\ & - c_6 \tan E + c_7 \sin A + c_8 \cos A + c_{12} A / 2\pi + c_{14} \sin 2A \\ & + c_{15} \cos 2A + c_{20} \sin 2A \sec E + c_{21} \cos 2A \sec E \quad \dots \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta E = & c_2 + c_3 \sin A - c_4 \cos A + c_9 \sin E + c_{10} \cos E \\ & + c_{11} \cot E + c_{13} E / 2\pi + c_{16} \sin A + c_{17} \cos A \\ & + c_{18} E \sin A + c_{19} E \cos A + c_{22} \sin 2A + c_{23} \cos 2A \quad \dots \quad (8) \end{aligned}$$

スプレッドシート“Model-2”の構成は前項の“数値モデル-1”と同様であり、“ソルバー”によるフィッティングの結果のみを**表-4**に示す。フィッティングの残差は0.17度であり、当初に設定した指向誤差の目標値0.3度を満足している。

考察 数値モデルの比較

数値モデルに基づいて測定データをフィッティングした結果、求めた係数(物理的要因毎の誤差係数)を用いて、測定時以外の方位/仰角への制御角度が計算可能となった。例えば、測定データにはないAZ=170度/EL=60度について計算すると、“数値モデル-1”ではAZ=170.53度/EL=60.02度に、“数値モデル-2”ではAZ=163.72度/EL=59.79度にアンテナ・コントローラ(角度エンコーダ読値)を設定すればよい。AZ=

170 度近辺の実測データからすると，“数値モデル-2”の方が良いフィッティングが得られているように思える。

“数値モデル-1”と“数値モデル-2”のフィッティング残差を比較すると、係数が多い“数値モデル-2”の残差が小さい。その理由を検討するために、誤差を求める多項式（式-(2), 式-(3), 式-(7) および 式-(8)）の項毎の誤差を、図-3, 図-4, 図-5 および 図-6 に示す。

図-3 によると，“数値モデル-1”の AZ 誤差においては、第 2 項の“AZ/EL 軸間の非直交性”および第 1 項の“機構的指向とビームのずれ”が大きいことが分かる。一方、第 5 項“AZ 軸受け歪み（南北方向）”、第 6 項“AZ 軸受け歪み（東西方向）”、第 7 項“AZ 軸傾き（北方向）”および第 8 項“AZ 軸傾き（東方向）”の影響が相対的（約 1/150）に小さい。

図-4 によると，“数値モデル-1”の EL 誤差においては、第 5 項の“フィードのたわみ”および第 2 項の“AZ 軸受け歪み（東西方向）”が大きいことが分かる。この EL 誤差での第 2 項“AZ 軸受け歪み（東西方向）”は、AZ 誤差では影響が相対的に小さいものであるが、誤差の大きさとしては AZ でも EL でも同程度である。一方、第 1 項“AZ 軸受け歪み（南北方向）”および第 3 項“AZ 軸傾き（北方向）”の影響が相対的（約 1/20）に小さい。

図-5 によると，“数値モデル-2”の AZ 誤差においては、第 2 項の“AZ 軸傾き（北方

| Error 誤差要因 | AZ 係数 | EL 係数 |
|------------------------------------|------------|------------|
| Collimation 機構的指向とビームのずれ | -0.1588189 | - |
| Non-perpendicularity AZ/EL 軸間の非直交性 | -0.2131724 | - |
| EL bearing (sin term) 軸受け歪み(sin 項) | 0.1106184 | - |
| EL bearing (cos term) 軸受け歪み(cos 項) | -0.1241039 | - |
| AZ bearing (NS term) 軸受け歪み(南北方向) | -0.0045482 | -0.0045482 |
| AZ bearing (EW term) 軸受け歪み(東西方向) | 0.0104769 | 0.0104769 |
| Tilt toward north AZ 軸傾き(北方向) | 0.0029309 | 0.0029309 |
| Tilt toward east AZ 軸傾き(東方向) | -0.0050241 | -0.0050241 |
| Flexure フィードのたわみ | - | -0.003069 |

表-3 : “数値モデル-1”によるフィッティング結果

| Error 誤差要因 | AZ 係数 | EL 係数 |
|---|------------|------------|
| AZ encoder offset AZ エンコーダ オフセット | -0.009137 | - |
| EL encoder offset EL エンコーダ オフセット | - | 0.0587029 |
| AZ axis tilt about North AZ 軸傾き(北方向) | -0.0657728 | -0.0657728 |
| AZ axis tilt about East AZ 軸傾き(北方向) | 0.0308882 | 0.0308882 |
| Collimation 機構的指向とビームのずれ | 0.0634787 | - |
| Non-orthogonality AZ/EL 軸間の非直交性 | -0.0082163 | - |
| AZ bearing ellipticity (sin) 軸受け歪み(sin) | -0.0061866 | - |
| AZ bearing ellipticity (cos) 軸受け歪み(cos) | 0.0844660 | - |
| EL bearing ellipticity (sin) 軸受け歪み(sin) | - | -0.0482953 |
| EL bearing ellipticity (cos) 軸受け歪み(cos) | - | -0.0323412 |
| Flexure フィードのたわみ | - | -0.0031051 |
| AZ encoder scale AZ エンコーダ スケール | -0.1532608 | - |
| EL encoder scale EL エンコーダ スケール | - | 0.0996189 |
| Bi-periodic in AZ (sin2A) 2 倍 ハーモニック 成分 | -0.0453765 | - |
| Bi-periodic in AZ (cos2A) 2 倍 ハーモニック 成分 | -0.0191358 | - |
| EL encoder stiction (sin) エンコーダ摩擦(sin) | - | 0.0569817 |
| EL encoder stiction (cos) エンコーダ摩擦(cos) | - | 0.0412524 |
| EL bearing stiction (sin) 軸受け摩擦(sin) | - | 0.0069159 |
| EL bearing stiction (cos) 軸受け摩擦(cos) | - | 0.0095171 |
| Scaled bi-periodic in AZ (sin) EL 依存 ハーモニック | -0.0074753 | - |
| Scaled bi-periodic in AZ (cos) EL 依存 ハーモニック | 0.0179938 | - |
| Bi-periodic in EL (sin) 2 倍 ハーモニック 成分 | - | 0.0042496 |
| Bi-periodic in EL (cos) 2 倍 ハーモニック 成分 | - | 0.0026903 |

表-4 : “数値モデル-2”によるフィッティング結果

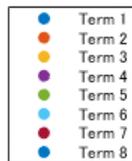
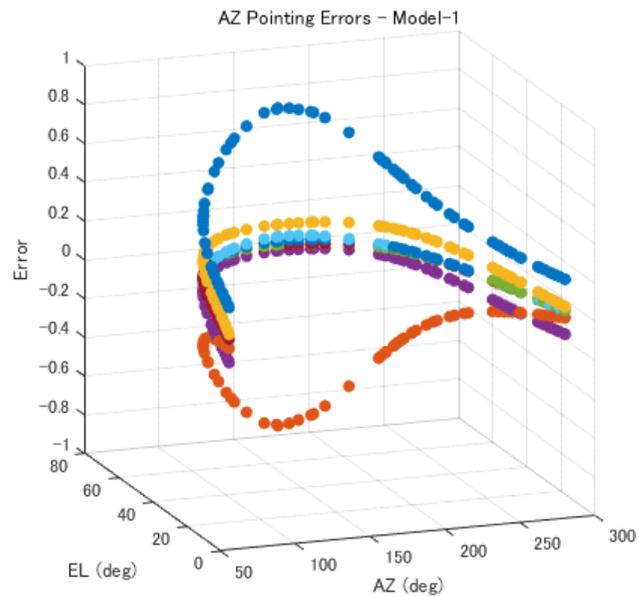


図-3 : “数値モデル-1” による要因毎の AZ 誤差

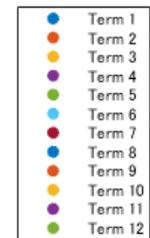
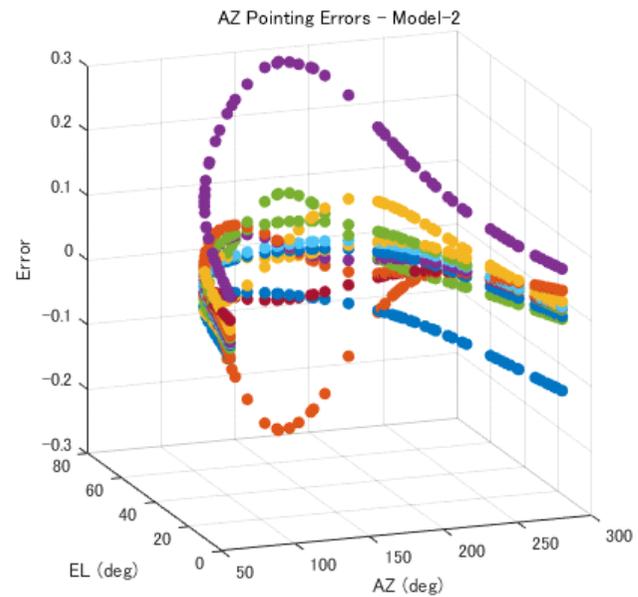


図-5 : “数値モデル-2” による要因毎の AZ 誤差

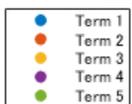
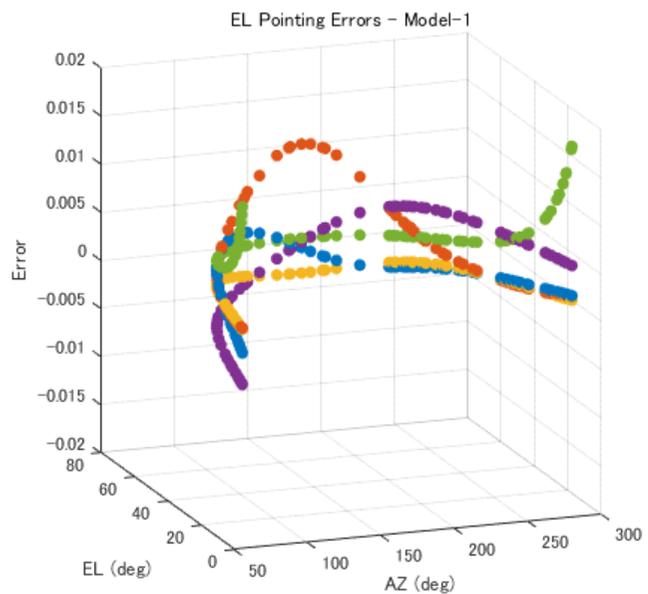


図-4 : “数値モデル-1” による要因毎の EL 誤差

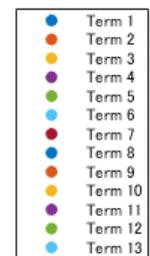
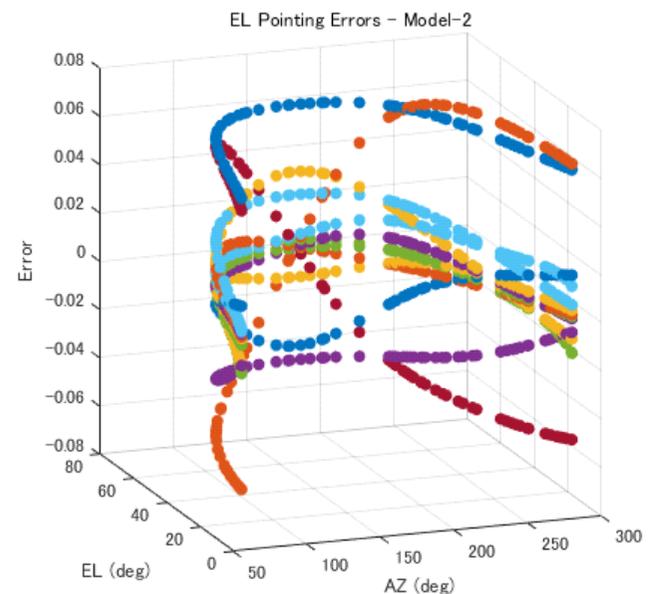


図-6 : “数値モデル-2” による要因毎の EL 誤差

向)”，第 4 項の“機構的指向とビームのずれ” および第 8 項の“AZ エンコーダ スケール” が大きいことが分かる。一方，第 1 項“AZ エンコーダ オフセット” および第 6 項“AZ 軸受け歪み (sin)” の影響が相対的 (約 1/50) に小さい。その他の項は，第 2 項の約 1/10 の大きさであるが，合算すると有意な誤差となっている。

図-6 によると，“数値モデル-2” の EL 誤差においては，第 1 項の“EL エンコーダ オフセット” および第 2 項の“AZ 軸傾き (北方向)” が大きいことが分かる。その他の項はこれらの項よりも小さいが，オーダーは同じであり，合算すると有意な誤差となっている。

図-3 ~ 図-6 の比較から，“数値モデル-1” と“数値モデル-2” で共通する大きな誤差要因は，“機構的指向とビームのずれ” と“AZ 軸傾き (北方向)” が挙げられる。ただし，“AZ 軸の傾き” については“北方向” のみならず“東西方向” も存在するので，“真北方向” にだけ傾いている訳ではない。また，図-3 ~ 図-6 の比較から，これら二つの誤差要因を補正しただけでは全く不十分であり，本例では“数値モデル-1” の 9 項目の誤差要因を“数値モデル-2” の 23 項目まで拡張することで，フィッティング (補正) 残差を 1/2 に改善できている。主要な要因以外の個々の誤差が相対的に小さくても，合算すれば有意な大きさになるので，誤差要因を拡張する効果が見て取れる。

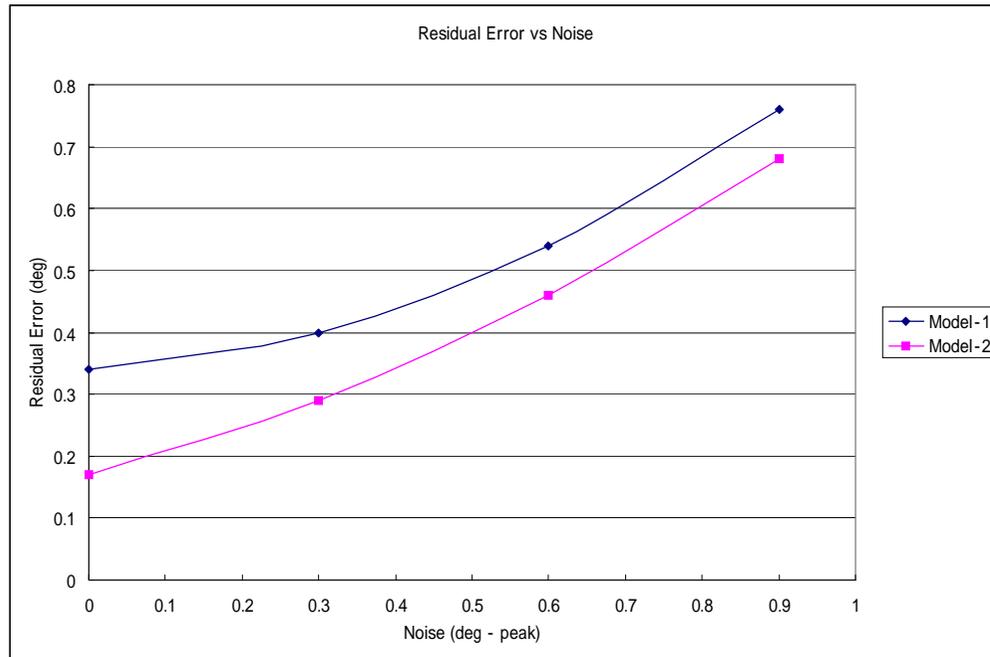


図-7 : 測定データ精度によるフィッティング残差への影響

考察 測定データ精度の影響

フィッティング残差を小さくするには，数値モデルの誤差要因項目数だけでなく，測定データの精度 (バラつき) を上げることが，本質的に重要である。測定データの精度については，文献 [4] で論じられている。本稿では前述のスプレッドシートを用いて，簡単な数値実験を行い，測定データの精度とフィッティング残差の関係を確認する。

数値実験では AZ/EL 測定データに ± 0.3 度， ± 0.6 度および ± 0.9 度の範囲の一様分布ランダムノイズを加算して，前述のフィッティングを行う。 ± 0.3 度刻みのノイズとするのは，前述の“必要な指向精度”での前提条件に基づく。一様分布ランダムノイズの生成は，Excel の RAND() 関数を用いる。

結果を図-7 に示す。“数値モデル-1” と“数値モデル-2” とともにノイズの付加によって残差が悪化している。使用した測定データ自体には，そもそも，測定誤差 (バラつき，例えば，レベル分解能に依存した角度誤差) が含まれていると考えられるので，意図的に付加したノイズ量と悪化量の関係を単純比較することはできないが，測定データの精度向上がフィッティング残差を小さくすることは，数値実験から理解できる。

今後の課題

本稿では JJ1NNJ 関 OM が取得された測定データを使用した，独自に校正データを取得するにあたって，下記の課題が考えられる。

- 点源ではない太陽雑音の測定と角度分解能
- レベル分解能とその安定度
- 測定の自動化
- 天球の校正領域

“点源ではない太陽雑音の測定と角度分解能” は，約 0.5 度の視直径を持つ太陽とアンテナ・ビームの鋭さの相対関係から，測定した方位/仰角の角度分解能がボケてしまう問題である。ビーム HPBW の 1/10 角度が太陽視直径よりも相対的に大きい場合，すなわちビームがブロードである場合，ビームの何処で太陽の中心を捉えているのか判別できない。逆の場合，太陽の何処をビームが捉えているのか判別できない。この問題に対応するには，逆畳み込み (Deconvolution) を必要とする。

“レベル分解能とその安定度” は，ランダム・ノイズ測定の一般的な課題である。ランダム・ノイズである太陽雑音を信号源とする場合，レベル分解能とその安定度は受信系の信号帯域 BW と積分 (平均化) 時間 T の BW・T 積に比例する。言い換えると，信号帯域

が狭い場合は、積分時間を長くしなければならない。相対位置が変化する太陽を信号源とする場合は、角度分解能が積分時間（測定時間）の制限条件となる。概算として、24時間で360度方位が変化する太陽が0.3度のビーム幅を通過する時間は72秒なので、この時間内で0.1 dB以下の安定度が得られる信号帯域幅BWを確保しなくてはならない。

“測定の自動化”は、高精度なアンテナ制御と表裏一体な課題だと考える。高精度なアンテナ制御を目指すならば、その仕掛けを用いて高精度な校正データが得られなくてはならない訳であって、自動的な測定ができないのは自己矛盾である。JJ1NNJ 関 OM と JA4BLC 又賀 OM ともに手動で精密な測定を行われていることは尊敬するところである。両 OM の結果と同等な精度を前述の課題を考慮して測定するには、測定の自動化が必須であろう。考察したように、フィッティング残差を低減するには測定データの精度そのものが重要であるので、自動化による測定データ数と精度の確保を目指したい。自動化の手法として、文献 [12] [13] にあるコニカル・スキャン法 (Conical Scan) を試してみたい。

“天球の校正領域”は、受信対象と関連する。EME では、月と同様な天球領域を通過する太陽雑音を信号源として校正データを取得すれば良いだろう。しかし、天球の北側を通過するような人工衛星や惑星探査機からの信号を受信する場合、南側だけの太陽雑音を基にした数値モデルが適用できる精度には疑問が残る。受信信号対象が通過する天球領域で校正信号源を確保できれば良いが、太陽雑音を用いた校正データ取得が現実解だと思われる。

まとめ

“数値モデル-2”を用いて校正データを処理すれば、HPBWの1/10という精度で任意の方位/仰角へアンテナを制御可能であることが分かった。指向誤差の原因であるアンテナ・マウントの不完全性を修整することなく目的とする指向精度が得られる意義は大きい。

本稿の基となる貴重な実測データを提供して頂いた JJ1NNJ 関 OM と JA4BLC 又賀 OM に深謝申し上げる。

//

参考文献

- [1] 帝京大学トピックス, “宇宙科学研究ユニットがはやぶさ2地球最接近後のX-band信号の観測実験に成功しました,” 2020年12月11日。
<https://www.teikyo-u.ac.jp/topics/2020/1211-2>
- [2] J-Jacques F1EHN, “EME SYSTEM V,” 01/2018.
https://f1ehn.pagesperso-orange.fr/download/EME_Doc_V7a.pdf
- [3] Meeks, Robert Leo. “Improving telescope mechanical error estimates using pointing data.” Colorado State University, 2003.
- [4] Meeks, Robert L. “Sources of uncertainty in telescope pointing models.” Modeling and Systems Engineering for Astronomy. Vol. 5497. International Society for Optics and Photonics, 2004
- [5] Luck, J. M. “Mount model stability.” 14th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation. 2004.
https://cddis.nasa.gov/lw14/docs/papers/cal6_ilm.pdf
- [6] de Vicente, P., and A. Barcia. “Deconstructing a pointing model for the 40M OAN radiotelescope.” 2007.
<https://icts-yebes.oan.es/reports/doc/IT-OAN-2007-26.pdf>
- [7] Taki, T. “A new concept in computers-aided telescopes,” Sky & Telescope, vol. 77, p. 194, 1989.
- [8] Taki, T. “Equations for Pointing Telescope,” April 3, 2004.
<http://takitoshimi.starfree.jp/aim/aim.htm>
- [9] Taki, T. “Matrix Method for Coordinates Transformation.” February 29, 2004..
http://takitoshimi.starfree.jp/matrix/matrix_method_rev_e.pdf
- [10] Chang, C. “DSN Telecommunications Link Design Handbook.” DSN Document 373.810 005 (2018).
<https://deepspace.jpl.nasa.gov/dsndocs/810-005/>
- [11] Ma, Tianming, Chunmei Zhao, and Zhengbin He. “Research on pointing correction algorithm of laser ranging telescope oriented to space debris.” Journal of Laser Applications 32.1 (2020): 012004.

<https://lia.scitation.org/doi/am-pdf/10.2351/1.5110748>

[12] Gawronski, Wodek, and Emily M. Craparo. "Antenna scanning techniques for estimation of spacecraft position." IEEE Antennas and Propagation Magazine 44.6 (2002): 38-45.

<https://www.researchgate.net/publication/3305046>

[13] Souza, André LG, et al. "Antenna pointing error estimation using conical scan technique and kalman filter." IEEE International Conference on Control and Automation. 2013.

<http://www.ene.unb.br/henrique/papers/SB113.pdf>