

円偏波受信機と直線偏波受信機が混在する JVN の振幅補正と位相補正 ～ BL Table の動作と扱いについて ～

1 干渉計の出力とストークスパラメータの関係

干渉計の相互相関出力 R_{mn} は、ストークスパラメータ I, Q, U, V を用いて表現すると以下の式の通り表現される。

$$\begin{aligned}
 R_{mn} &= G_{mn} \langle V'_m V'^*_n \rangle \\
 &= \frac{1}{2} G_{mn} [I \{ \cos(\psi_m - \psi_n) \cos(\chi_m - \chi_n) + j \sin(\psi_m - \psi_n) \sin(\chi_m + \chi_n) \} \\
 &\quad + Q \{ \cos(\psi_m + \psi_n) \cos(\chi_m + \chi_n) + j \sin(\psi_m + \psi_n) \sin(\chi_m - \chi_n) \} \\
 &\quad + U \{ \sin(\psi_m + \psi_n) \cos(\chi_m + \chi_n) - j \cos(\psi_m + \psi_n) \sin(\chi_m - \chi_n) \} \\
 &\quad - V \{ \cos(\psi_m - \psi_n) \sin(\chi_m + \chi_n) + j \sin(\psi_m - \psi_n) \cos(\chi_m - \chi_n) \}] \quad (1)
 \end{aligned}$$

ここで、 m, n は観測局、 ψ_m と ψ_n はそれぞれ観測局 m, n における parallactic angle である。偏波楕円と角度 ψ および χ の関係は図1の通りである。

今年の5月までは、JVN 6.7 GHz 観測網では局によって設置される受信機が異なり、円偏波受信機と直線偏波受信機が混在していた。円偏波受信機の場合 χ は $\pi/4$ 、直線偏波受信機の場合 0 となるため、基線によって式(1)で表される相互関数出力は異なってくる。すなわち式(1)は、(a) 円偏波受信機同士の場合、(b) 円偏波受信機と直線偏波受信機間の場合、(c) 直線偏波受信機同士の場合、の3通りの表記ができる。

$$R_{mn} = \begin{cases} \frac{1}{2} G_{mn} I \{ \cos(\psi_m - \psi_n) + j \sin(\psi_m - \psi_n) \} & \text{(a: 円-円の時)} \\ \frac{\sqrt{2}}{4} G_{mn} I \{ \cos(\psi_m - \psi_n) + j \sin(\psi_m - \psi_n) \} & \text{(b: 円-直の時)} \\ \frac{1}{2} G_{mn} I \cos(\psi_m - \psi_n) & \text{(c: 直-直の時)} \end{cases} \quad (2)$$

従って、相関出力 R_{mn} の振幅値 $|R_{mn}|$ は

$$|R_{mn}| = \begin{cases} \frac{1}{2} G_{mn} I \sqrt{\cos^2(\psi_m - \psi_n) + \sin^2(\psi_m - \psi_n)} = \frac{1}{2} G_{mn} I & \text{(a: 円-円の時)} \\ \frac{\sqrt{2}}{4} G_{mn} I \sqrt{\cos^2(\psi_m - \psi_n) + \sin^2(\psi_m - \psi_n)} = \frac{\sqrt{2}}{4} G_{mn} I & \text{(b: 円-直の時)} \\ \frac{1}{2} G_{mn} I \cos(\psi_m - \psi_n) & \text{(c: 直-直の時)} \end{cases} \quad (3)$$

と求められる。すなわち (a) を基準にすると、(b) は (a) の $\sqrt{2}/2$ 倍、(c) は (a) の $\cos(\psi_m - \psi_n)$ 倍、となる。

2 AIPS の BL テーブル

基線毎のゲインの補正をするために、AIPS の BL extension table を編集してレジビリティにあてる。BL table は、各基線の複素ゲインを乗算部と加算部に分けて作り上げることが出来る extension table で、表1の通り合計10のカラムで構成されている。

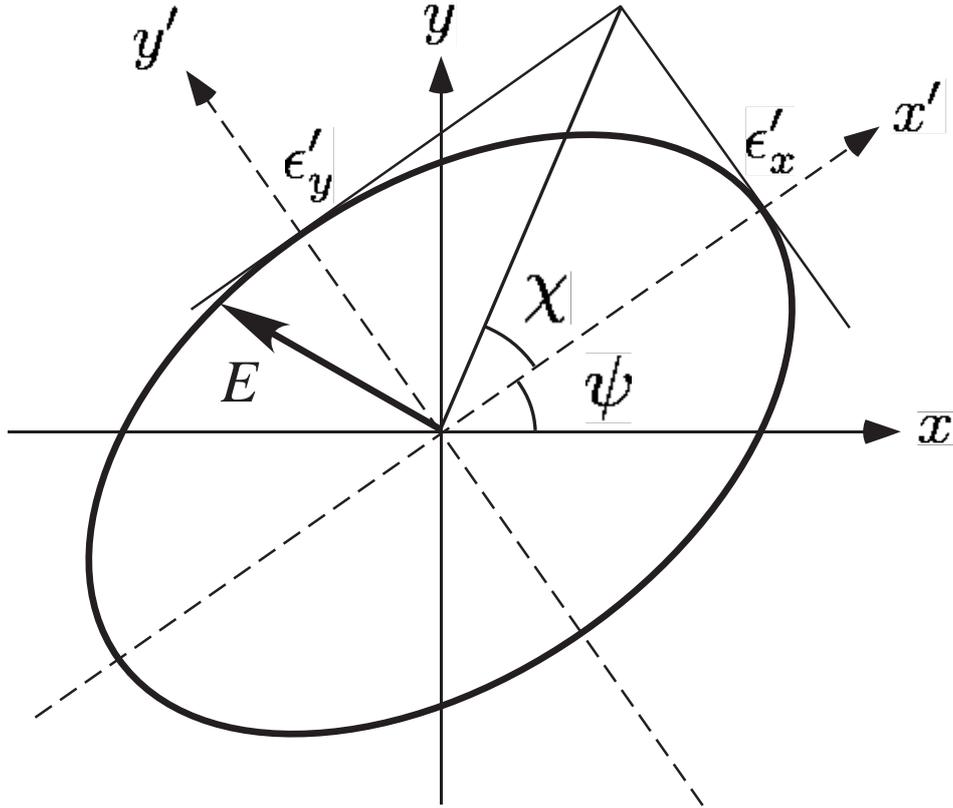


図 1: 偏波楕円と電場成分 x および y の関係

図 2 の BL table の例では、SOURCE ID 17 番の天体が観測開始後 3.132517e-01 日と 7.549133e-01 日に行なわれた、ということになる。ROW 番号 1 番のデータは、観測局 1 番と観測局 2 番の基線によるものである。各データのゲインは、REAL M1、IMAG M1、REAL A1 および IMAG A1 を使って作り出す。REAL M1 と IMAG M1 は、係数（乗算）としての複素ゲインの Real 部分と Imaginary 部分であり、そのゲインの振幅と位相は

$$\text{振幅} = \sqrt{(\text{REAL M1})^2 + (\text{IMAG M1})^2} \quad (4)$$

$$\text{位相} = \tan^{-1} \left(\frac{\text{IMAG M1}}{\text{REAL M1}} \right) \quad (5)$$

と表せる。すなわちこのゲインは振幅を $\sqrt{(\text{REAL M1})^2 + (\text{IMAG M1})^2}$ 倍し、位相を $\tan^{-1} \left(\frac{\text{IMAG M1}}{\text{REAL M1}} \right)$ だけプラスにずらす。

例として、この ROW 番号 1 番のデータのように REAL M1 = 1.732050E+00、IMAG M1 = 1.000000E+00 が与えられているとする。この場合、振幅は 2 倍し、位相は 30 度ずらす複素ゲインが設定されていることになる。

3 解析時の振幅補正の仕方

- 観測の各スキャン毎に各アンテナの parallactic angle を求めておく。NRAO のスケジュールソフトウェア SCHED や、AIPS のタスク `UVPLT` で求めることができる。

COL. NO.	1	2	3	4	5	6	7
ROW NUMBER	TIME DAYS	SOURCE I	SUBARRAY	ANTENNA1	ANTENNA2	FREQ ID	REAL M1
BEGIN*PASS							
1	3.132517E-01	17	1	1	2	1	1.732050E+00
2	3.132517E-01	17	1	1	3	1	1.732050E+00
3	3.132517E-01	17	1	1	4	1	1.732050E+00
4	3.132517E-01	17	1	1	5	1	1.732050E+00
5	3.132517E-01	17	1	2	3	1	1.732050E+00
6	3.132517E-01	17	1	2	4	1	1.732050E+00
7	3.132517E-01	17	1	2	5	1	1.732050E+00
8	3.132517E-01	17	1	3	4	1	1.732050E+00
9	3.132517E-01	17	1	3	5	1	1.732050E+00
10	3.132517E-01	17	1	4	5	1	1.732050E+00
11	7.549133E-01	17	1	1	2	1	-1.000000E+00
12	7.549133E-01	17	1	1	3	1	-1.000000E+00
13	7.549133E-01	17	1	1	4	1	-1.000000E+00
14	7.549133E-01	17	1	1	5	1	-1.000000E+00
15	7.549133E-01	17	1	2	3	1	-1.000000E+00
16	7.549133E-01	17	1	2	4	1	-1.000000E+00
17	7.549133E-01	17	1	2	5	1	-1.000000E+00
18	7.549133E-01	17	1	3	4	1	-1.000000E+00
19	7.549133E-01	17	1	3	5	1	-1.000000E+00
20	7.549133E-01	17	1	4	5	1	-1.000000E+00
END*PASS							
COL. NO.	8	9	10				
ROW NUMBER	IMAG M1	REAL A1	IMAG A1				
BEGIN*PASS							
1	1.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00				
2	1.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00				
3	1.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00				
4	1.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00				
5	1.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00				
6	1.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00				
7	1.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00				
8	1.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00				
9	1.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00				
10	1.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00				
11	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00				
12	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00				
13	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00				
14	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00				
15	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00				
16	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00				
17	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00				
18	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00				
19	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00				
20	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00				
21	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00				
22	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00				
23	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00				
24	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00				

図 2: BL table の中身

表 1: BL table のコラム構成

ROW	データの通し番号。
TIME	そのデータの中央時刻。単位は「日」。観測開始時刻が「0.0 日」となる。
SOURCE ID	そのデータの観測天体の ID。SU table に記載されているものと同じ。
SUBARRAY	サブアレイ番号。
ANTENNA1	一番目の観測局の ID。AN table に記載されているものと同じ。
ANTENNA2	二番目の観測局の ID。AN table に記載されているものと同じ。
FREQ ID	周波数 ID。
REAL M1	ゲインの乗算部分の Real 部分。
IMAG M1	ゲインの乗算部分の Imaginary 部分。
REAL A1	ゲインの加算部分の Real 部分。
IMAG A1	ゲインの加算部分の Imaginary 部分。

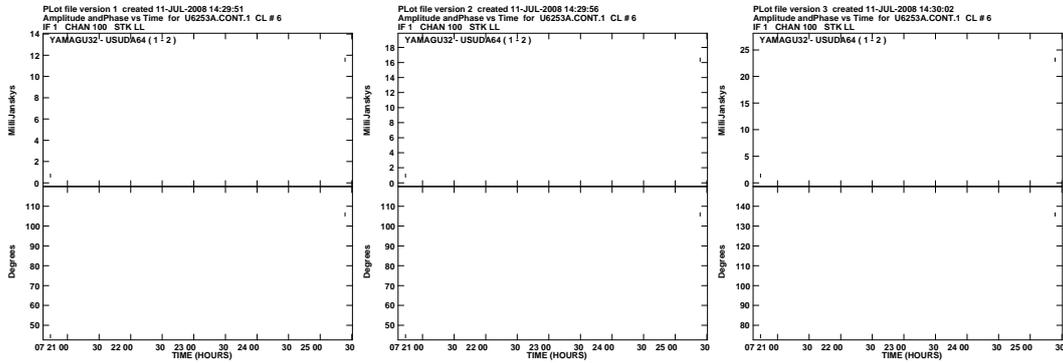


図 3: (左)BL table を読まないとき。(中) REAL M1 = 1.414、IMAG M1 = 0.0 のとき。振幅は 1.414 倍になるが、位相は変化無し。(右) REAL M1 = 1.732、IMAG M1 = 1.0 のとき。振幅は 2 倍になり、位相は 30 度まわる。

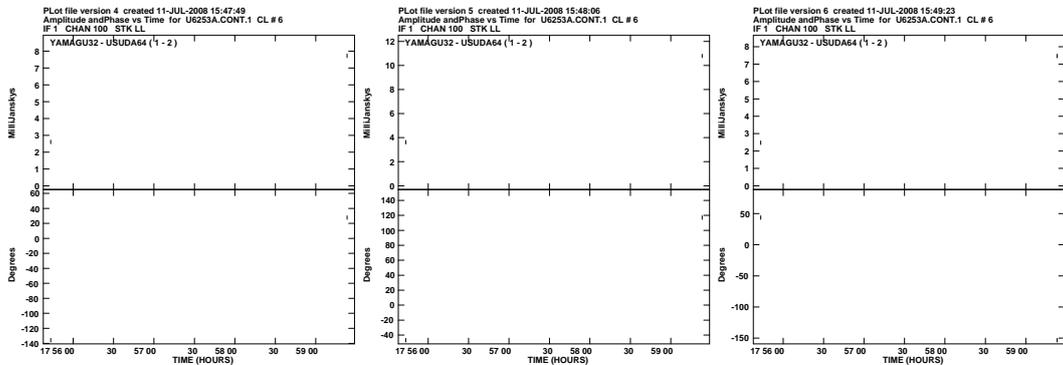


図 4: (左)BL table を読まないとき。(中) REAL M1 = 0.0、IMAG M1 = 1.414 のとき。振幅は 1.414 倍になり、位相は 90 度変化する。(右) REAL M1 = -1.0、IMAG M1 = 0.0 のとき。振幅は 1 倍のまま変化無し、位相は 180 度まわる。

- AIPS のビジビリティデータのデフォルトでは BL table は存在しないので、まず BL table の雛形を作る。タスク `BLCAL` を実行すると BL table が出来る。アドバープ `solint` は、どのくらいの頻度でビジビリティの補正を行ないたいかで設定する。例えば、2分毎に天体をスイッチングしているのであれば、`solint` は2分以下に設定すべきである。
- タスク `TBOUT` を用いて、先程作った雛形の BL table をテキストファイルに落とす。そのテキストファイルは図 2 のように 10 個のカラムを持っている。
- そのテキストファイルの REAL M1、IMAG M1、REAL A1 および IMAG A1 を編集して、基線毎に与えたいゲインの設定をする。例えば、振幅だけ 1.414 倍したい場合は REAL M1 = 1.414、IMAG M1 = 0.0、REAL A1 = 0.0、IMAG A1 = 0.0 とする。また、直線偏波受信機同士の基線の振幅を $1/\cos(\psi_m - \psi_n)$ 倍したい場合も、各スキャン毎の parallactic angle の値を使って REAL M1 の値を入れる。
- 編集後のテキストファイルを、今度はタスク `TBIN` を用いて新しい BL table として読み込む。
- 今後、アドバープ `BLVER` を用いて BL table を読み込むことにより、基線毎に設定したゲインをあてることが出来る。

4 円偏波受信機と直線偏波受信機が混在する VLBI 網の位相の出力

R_{mn} の位相は式 (2) を見て明らかなように観測局 m, n 間のビジビリティでは (a) の円-円偏波の時と (b) の円-直線偏波の時 $\psi_m - \psi_n$ だけずれが生じる。(c) の直線-直線偏波の時は位相のずれは生じない。

5 解析時の位相補正の仕方

現在のところ、以下の 3 つの補正方法が考えられる。

Self Calibration により無視

ターゲット天体で Self Calibration すれば parallactic angle による位相のずれは除去出来る。Self Calibration では、閉じた 3 基線のビジビリティを並べて積をとった Closure ビジビリティの位相 $\phi_{obs12} + \phi_{obs23} + \phi_{obs31}$ を用いる。この位相は Closure Phase と呼ばれる。各基線の位相はそれぞれ

$$\phi_{obs12} = 2\pi\{\nu_{RF}\tau_{g12} + \nu_{RF}(\tau_{a2} - \tau_{a1}) + \nu_{IF}(\tau_{i2} - \tau_{i1}) + \nu_{IF}(\tau_{c2} - \tau_{c1})\} \quad (6)$$

$$\phi_{obs23} = 2\pi\{\nu_{RF}\tau_{g23} + \nu_{RF}(\tau_{a3} - \tau_{a2}) + \nu_{IF}(\tau_{i3} - \tau_{i2}) + \nu_{IF}(\tau_{c3} - \tau_{c2})\} \quad (7)$$

$$\phi_{obs31} = 2\pi\{\nu_{RF}\tau_{g31} + \nu_{RF}(\tau_{a1} - \tau_{a3}) + \nu_{IF}(\tau_{i1} - \tau_{i3}) + \nu_{IF}(\tau_{c1} - \tau_{c3})\} \quad (8)$$

ν_{RF} : 観測周波数。

ν_{IF} : ダウンコンパート後の中間周波数。

- τ_g : 局 1,2 間の幾何学的遅延時間差。
- τ_a : 大気変動による局毎の電波信号の大気内通過遅延時間。
- τ_i : 局内の信号通過遅延時間。添え数字は局番号。
- τ_c : 局内の時計の時刻のオフセット。

なので Closure Phase は様々な遅延時間残差が相殺されて $2\pi\nu_{RF}(\tau_{g12} + \tau_{g23} + \tau_{g31})$ のみが残る。Parallactic angle による位相のずれは局内の信号通過遅延時間の項に含まれる。注意点は、Parallactic angle は天体によって異なることであり、例えば Phase Referenced VLBI のように他天体で Self Calibration した解をターゲット天体に与えるとターゲット天体での Parallactic angle の補正は出来ていないことになる。

CLCOR を実行する方法

AIPS では、円偏波受信機搭載の VLA および VLBA の parallactic angle による位相補正としてタスク `CLCOR` を用いることを推奨している。手間はさほどかからない。

BL table を使う方法

振幅と同様、BL table を用いて位相を変化させるゲインの設定も出来る。BL table の元となるテキストファイルを自分自身で編集しなければならないため、ここに挙げた中ではもっとも手間がかかる。