

Calibrazione di uno spettropolarimetro digitale per osservazioni radioastronomiche

Paola Di Ninni¹, Giovanni Comoretto²

¹Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università degli Studi di Firenze

²INAF Osservatorio Astrofisico di Arcetri

Arcetri Technical Report N° 1/2010

Revision 2 - Updated 25 June 2012

Sommario

Per il radiotelescopio SRT è stato realizzato uno spettropolarimetro multicanale progettato per essere utilizzato con un ricevitore multi-beam nella banda 18-26 GHz.

In questo rapporto tecnico sarà esposto il modello matematico sviluppato per la calibrazione dell'intero apparato di misura e la procedura utilizzata per ottenere i parametri del modello mediante segnali emessi da sorgenti celesti. Saranno illustrati inoltre i risultati ottenuti dalla rivelazione della radiazione lunare presso la stazione radioastronomica di Medicina, utilizzando il ricevitore a singolo beam a 22 GHz disponibile.

Il presente lavoro è stato tratto dalla tesi di laurea svolta nel gruppo di ricerca di Radioastronomia dell'Osservatorio di Arcetri, per ulteriori approfondimenti si rimanda a [4].

1. Introduzione

In previsione della realizzazione di SRT, Sardinia Radio Telescope, presso il laboratorio di Radioastronomia dell'Osservatorio di Arcetri sono stati progettati e realizzati un ricevitore multi-beam composto da sette ricevitori adiacenti [1] e il relativo back-end [2], l'ultimo stadio di un radiotelescopio la cui funzione è misurare i parametri del segnale di interesse per l'astronomo.

Il back-end è stato inizialmente pensato per misurare solo lo spettro di potenza dei segnali radioastronomici [3], successivamente sono state apportate modifiche al progetto originale per implementare un polarimetro digitale in grado di misurare lo stato completo della polarizzazione del segnale (parametri di Stokes) sia in riga che nel continuo (capitolo 4 in [4]).

Mediante segnali generati in laboratorio sono state eseguite misure che hanno permesso di caratterizzare lo strumento in termini di risposta in frequenza, isolamento, stabilità e linearità (capitolo 5 in [4]).

Misure di calibrazione sono state quindi effettuate presso la stazione radioastronomica di Medicina con un ricevitore a singolo beam a doppia polarizzazione circolare a 22 GHz. Mediante un modello matematico appositamente sviluppato nel lavoro di tesi [4], la misura di radiazione non polarizzata ha consentito di stimare il rapporto tra i guadagni dei due canali del ricevitore, ciascun canale è relativo ad uno stato di polarizzazione, e i termini che quantificano l'isolamento esistente tra loro. Per determinare l'orientazione del ricevitore rispetto al sistema di riferimento celeste è stata osservata una sorgente con stato di polarizzazione noto. A questo scopo è stata scelta la Luna, la cui radiazione presenta un grado di polarizzazione lineare orientato in direzione radiale rispetto al disco (capitolo 6 in [4]).

Lo strumento è stato inoltre impiegato per osservare due regioni di formazione stellare a 22 GHz: W49N e Orione KL. L'interpretazione del parametro di Stokes V per mezzo dell'effetto Zeeman ha consentito di stimare il campo magnetico presente nella regione W49N, mentre la misura dei parametri Q e U ha permesso di valutare il grado di polarizzazione lineare di Orione KL. Un confronto con i dati presenti in letteratura ha dato un esito positivo in entrambi i casi, arricchendo le conoscenze astronomiche e confermando un corretto funzionamento dello strumento (capitolo 7 in [4]).

Nella sezione 2 di questo rapporto viene descritto brevemente il polarimetro digitale; la sezione 3 illustra il modello matematico sviluppato per calibrare il rapporto tra i guadagni di due canali del radiotelescopio che elaborano i segnali con stati di polarizzazione ortogonali, i termini di isolamento tra questi e l'angolo di cui è ruotato il ricevitore del radiotelescopio rispetto al sistema di riferimento celeste adottato. Nell'ultima sezione (4) vengono riportati i risultati dedotti applicando questo modello di calibrazione alla radiazione lunare misurata a 22 GHz.

2. Progettazione del polarimetro digitale

I ricevitori attuali a radiofrequenza presentano sensibilità che si avvicinano al limite quantistico, $T_n = h\nu/k$, dove T_n è la temperatura equivalente di rumore, e ν la frequenza di osservazione. Per ottimizzare il tempo di utilizzo del telescopio durante un'osservazione, si tende a realizzare ricevitori multi-beam in grado di osservare simultaneamente più punti di cielo.

Un ricevitore di questo tipo (a 7 beam) è stato realizzato per il radiotelescopio SRT [5]. La radiazione rivelata da ciascun ricevitore viene separata nelle due componenti a polarizzazione circolare destra e sinistra. I segnali così ottenuti vengono convertiti a frequenze intermedie (IF) più basse e trasmessi a due canali dello spettropolarimetro che elaborano gli stati di polarizzazione ortogonali.

La fig. 1 mostra lo schema relativo ad una coppia di canali dello spettropolarimetro, di cui il relativo back-end spettroscopico è stato realizzato con tecniche digitali. Il segnale analogico viene convertito in una scheda ADC, e quindi processato in una scheda FFT da una serie di componenti che operano sulla rappresentazione numerica del segnale.

Le caratteristiche fondamentali del back-end sono:

- Banda di ingresso: 125 MHz teorici, 100 MHz effettivi (determinati dal filtro analogico di ingresso)
- Numero di canali di ingresso: 16, organizzati in 8 coppie polarimetriche
- Banda analizzabile: da 0.5 a 125 MHz (in step binari e posizionabile in modo arbitrario nella banda di ingresso)

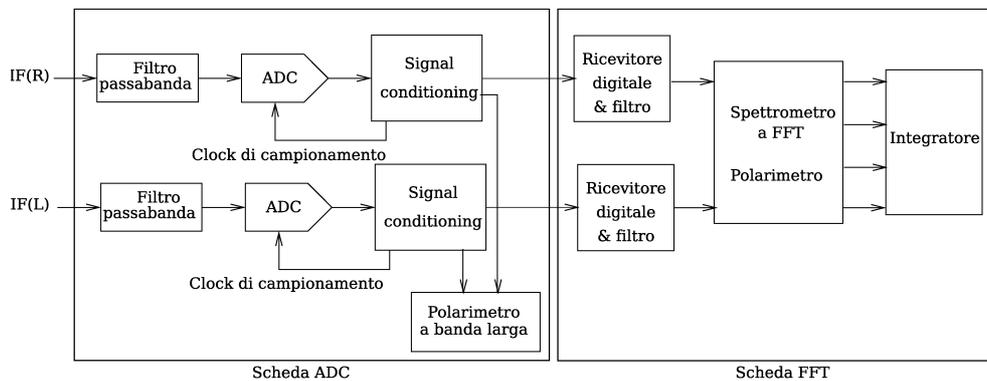


Figure 1. Schema circuitale di due canali dello spettropolarimetro. Con IF(R) e IF(L) vengono indicati gli ingressi dei segnali con polarizzazione circolare destrorsa e sinistrorsa rispettivamente.

- Risoluzione spettrale: 4096 punti nella banda analizzabile.

La misura dello stato di polarizzazione può avvenire in due punti. Il polarimetro a banda larga implementato sulla *scheda ADC* fornisce una misura di densità spettrale di potenza integrata sull'intera banda di ingresso dello strumento. Questo modulo viene impiegato per misure in cui sono essenziali brevi tempi di integrazione; nella versione attuale il tempo minimo di integrazione risulta circa 10 ms. Il secondo invece, realizzato sulla *scheda FFT* a valle dello spettrometro, fornisce valori di densità spettrale di potenza con elevata risoluzione su una banda variabile, selezionabile tra 125 MHz e 0.5 MHz a seconda della frequenza radio che si vuole elaborare, e ulteriormente suddivisa in 4096 punti spettrali. Questo modulo calcola quindi quattro spettri attraverso i quali vengono ricostruiti i quattro parametri di Stokes. Oltre che per misure spettropolarimetriche, la possibilità di discriminare in frequenza può essere utilizzata per isolare ed eliminare segnali interferenti in misure nel continuo. I tempi di integrazione sono però necessariamente maggiori, in quanto è necessario acquisire una quantità molto maggiore di dati.

3. Modello matematico sviluppato per la calibrazione strumentale

Lo spettropolarimetro fornisce all'uscita dell'integratore i termini $E_L E_L^*$, $E_R E_R^*$, $\text{Re}(E_R E_L^*)$ e $\text{Im}(E_R E_L^*)$ calcolati su tutta la banda di ingresso o in funzione della frequenza (vedi fig. 1); E_L ed E_R sono due segnali complessi a frequenze intermedie con polarizzazione circolare sinistrorsa e destrorsa rispettivamente. I parametri di Stokes vengono valutati in fase di elaborazione dati applicando le seguenti equazioni (vedi [6]):

$$I = E_L E_L^* + E_R E_R^* \quad (1)$$

$$Q = 2\text{Re}(E_R E_L^*) \quad (2)$$

$$U = 2\text{Im}(E_R E_L^*) \quad (3)$$

$$V = E_L E_L^* - E_R E_R^*. \quad (4)$$

Il modello matematico sviluppato in [4] è stato di seguito riportato; esso descrive una tecnica di calibrazione che consente di ricavare i veri parametri di Stokes a partire dalle quantità misurate. Facendo ricorso alle matrici di Jones [7], la relazione matriciale che lega le componenti del campo elettrico misurate, E'_R e E'_L , e quelle vere, E_R e E_L , è

$$\begin{pmatrix} E'_R \\ E'_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g_R & 0 \\ 0 & g_L e^{i\varphi} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & b \\ c & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{-i\psi} & 0 \\ 0 & e^{i\psi} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_R \\ E_L \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Le grandezze reali g_R e g_L esprimono i guadagni, a priori diversi, dei due canali dello strumento, l'angolo φ è lo sfasamento relativo tra questi definito come la differenza di fase esistente tra il canale in cui si propaga E_L e quello in cui si propaga E_R , mentre le quantità complesse b e c sono i termini di

cross-talk (con questo termine si indica la presenza di una frazione di segnale polarizzato avente una certa fase nel canale che rivela lo stato di polarizzazione opposto). L'angolo ψ è una combinazione di angoli, corrispondenti a rotazioni geometriche dell'antenna e del ricevitore, il cui effetto è quello di ruotare il piano di polarizzazione lineare della radiazione emessa dalla sorgente.

Nell'ipotesi in cui sia $|b|, |c| \ll 1$ e $|E_R E_L^*|$ molto minore dell'intensità della radiazione (ipotesi di polarizzazione lineare trascurabile) e trascurando i termini di ordine superiore, dalla (5) si ricava che le quantità misurate dallo spettropolarimetro sono:

$$E'_R E'^*_R = g_R^2 \cdot |E_R|^2 \quad (6)$$

$$E'_L E'^*_L = g_L^2 \cdot |E_L|^2 \quad (7)$$

$$E'_R E'^*_L = g_R g_L e^{-i\varphi} (c^* |E_R|^2 + b |E_L|^2). \quad (8)$$

Tecniche di calibrazione standard che impiegano una lampada di rumore, ovvero un generatore di rumore bianco posto davanti al ricevitore, o una sorgente astronomica non polarizzata, consentono di ricavare il termine $G = g_R^2/g_L^2$, ossia il guadagno relativo tra i due canali dell'intero apparato di misura. Nel caso di sorgente non polarizzata sarà semplicemente

$$G = \frac{g_R^2}{g_L^2} = \frac{E'_R E'^*_R}{E'_L E'^*_L}. \quad (9)$$

I guadagni g_R e g_L sono ottenuti utilizzando tecniche astronomiche standard di calibrazione, ma di solito gli errori relativi sono molto maggiori di quanto sia possibile ottenere per il loro rapporto G . Per una sorgente non polarizzata di intensità vera $I_V = 2|E_R|^2 = 2|E_L|^2$ l'eq. (8) diventa

$$\frac{2E'_R E'^*_L}{g_R g_L I_V} = e^{-i\varphi} (c^* + b) \quad (10)$$

da cui

$$e^{-i\varphi} (c^* + b) = \sqrt{G} \frac{2E'_R E'^*_L}{E'_R E'^*_R + G E'_L E'^*_L}. \quad (11)$$

Il termine a primo membro può essere riscritto come

$$e^{-i\varphi} (c^* + b) = \alpha + i\beta \quad (12)$$

con α e β parametri reali. Il modello finora esposto consente quindi di ricavare i parametri Q_V e U_V per una radiazione polarizzata linearmente a meno di una rotazione espressa come combinazione degli angoli φ e ψ .

Nel caso in cui il termine $|E_R E_L^*|$ non sia trascurabile, sviluppando la relazione matriciale (5) risulta che i parametri Q_V e U_V vengono ruotati di un fattore $e^{-i(\varphi+2\psi)}$ e sono ricavabili utilizzando la relazione

$$e^{-i(\varphi+2\psi)} (Q_V + iU_V) = \frac{2E'_R E'^*_L}{g_R g_L} - (\alpha + i\beta) \frac{|E'_R|^2 + G|E'_L|^2}{g_R^2}. \quad (13)$$

Lo sfasamento φ può essere misurato utilizzando la lampada di rumore come sorgente di calibrazione dopo aver apportato le correzioni in guadagno e rimosso il contributo di cross-talk. Per stimare l'angolo ψ è necessario invece disporre di radiazione polarizzata linearmente lungo un asse noto, ovvero con angolo di posizione noto. Per una discussione più approfondita del modello di calibrazione sviluppato si rimanda al capitolo 6 in [4].

4. Procedura di calibrazione

In previsione della sessione osservativa, come calibratore dello strumento realizzato è stata scelta la Luna.

A lunghezze d'onda centimetriche e millimetriche, 0.3 - 30 cm, la radiazione lunare è dominata da emissione termica della regolite, uno strato che si estende tipicamente per i primi 10 - 20 cm dalla superficie lunare. Questa radiazione è intrinsecamente non polarizzata, ma lo strato dielettrico di regolite introduce una polarizzazione lineare poiché agisce come schermo inclinato parzialmente assorbente [8]. L'effetto che ne deriva è una polarizzazione diretta radialmente con ampiezza decrescente verso il centro e massima al bordo del disco lunare [9].

La variazione dello stato di polarizzazione della radiazione lunare lungo la superficie consente di impiegare il satellite come sorgente polarizzata e non polarizzata al tempo stesso, a seconda della zona superficiale considerata. Pertanto le equazioni (9) e (11) forniscono un insieme di relazioni utili per eseguire la calibrazione dell'apparato di misura.

4.1. Calibrazione dei parametri strumentali G , α e β

Durante la sessione del 31 Gennaio 2008, presso la stazione radioastronomica di Medicina sono state eseguite osservazioni della Luna a 22 GHz.

La tecnica di mappatura impiegata è l'*On-The-Fly*; questa consiste in una scansione continua nel tempo in ascensione retta (α) e/o declinazione (δ), misurata mentre l'antenna si sposta a velocità costante lungo la sorgente.

Per eseguire la calibrazione dei tre parametri strumentali G , α e β sono state impiegate tre scansioni, qui numerate dall'uno al tre, la prima corrispondente alla direzione Sud→Nord, e le ultime due alla direzione SudOvest→NordEst. La fig. 2 mostra gli andamenti dell'intensità della radiazione lungo il disco lunare nei due stati di polarizzazione circolare (a sinistra) e l'andamento della polarizzazione lineare (a destra); entrambe le figure si riferiscono ad una scansione Sud→Nord e riportano i dati non calibrati. Osservando entrambe le figure risulta chiaro che nella regione centrale della Luna ($|r_C| < 3'$), in cui la radiazione non è polarizzata, viene misurato un grado di polarizzazione lineare e circolare non nullo. Questo è il risultato degli effetti strumentali discussi nella sezione 3.

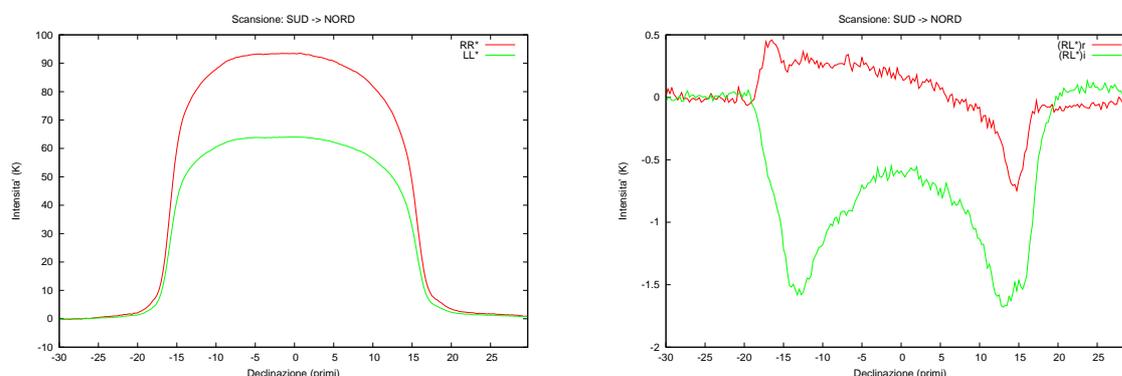


Figure 2. Andamento dell'intensità della radiazione lunare, misurata e non calibrata, relativa ai termini $E'_R E'^*_R$ ed $E'_L E'^*_L$ (a sinistra) e ai termini $\text{Re}(E'_R E'^*_L)$, $\text{Im}(E'_R E'^*_L)$ (a destra).

Le operazioni di fit, attraverso cui sono stati ricavati i valori dei parametri, sono state eseguite limitando i punti sperimentali a due regioni così definite:

- zona centrale della Luna: $|r_C| < 3'$
- bordo della Luna: $3' < |r_B| < 13'$.

I valori dei parametri G , α e β sono stati stimati applicando le eq. (9) e (11) alla radiazione non polarizzata proveniente dalla zona centrale del disco lunare. I valori stimati per le tre scansioni sono riportati nella tabella 1.

Scansione	G	α	β
scan ₁	1.461±0.003	0.00353±0.00016	-0.01026±0.00022
scan ₂	1.449±0.003	0.00258±0.00013	-0.01004±0.00018
scan ₃	1.467±0.003	0.00311±0.00015	-0.00986±0.00017

Table 1. Valori dei parametri strumentali G , α e β stimati per le tre scansioni.

Sebbene i singoli valori di G siano molto precisi, l'errore relativo per ciascuno è infatti solo lo 0.2%, i risultati non sono consistenti tra loro. Questo andamento va attribuito a fluttuazioni temporali

dell'elettronica del radiotelescopio, la cui causa sarà oggetto di indagini future. In assenza di fluttuazioni temporali il valore di G dedotto attraverso queste misure potrebbe essere riutilizzato ogni qualvolta venga fatta un'osservazione alla medesima frequenza e con lo stesso apparato di misura. I parametri α e β dipendono da φ , che a sua volta varia nel tempo (ad es. per una variazione della lunghezza dei cavi) e quindi per confrontarli nel tempo occorre rimuovere prima questa dipendenza tramite misure di polarizzazione effettuate sulla marca di calibrazione.

4.2. Calibrazione dell'angolo di rotazione strumentale γ

L'angolo di posizione osservato χ_o dipende da diversi fattori geometrici ed elettrici, oltre che dal suo valore vero χ_v , che nel nostro caso coincide con la direzione della scansione. Con la notazione adottata gli sfasamenti elettrici sono inclusi nell'angolo φ , che può essere misurato direttamente osservando la fase del segnale prodotto dalla lampada di calibrazione. I fattori geometrici, corrispondenti a rotazioni fisiche del ricevitore, sono inclusi nel termine ψ .

$$\chi_o - \chi_v = \frac{\varphi + 2\psi}{2} = \frac{\varphi}{2} + \psi(\gamma, PA_{az}, \chi_F). \quad (14)$$

Nella precedente relazione il fattore $1/2$ deriva dalla definizione dell'angolo di posizione [6], e ψ è espresso in funzione di γ (l'angolo di rotazione del ricevitore del radiotelescopio rispetto al sistema di riferimento celeste), di PA_{az} (l'angolo parallattico) e di χ_F (la rotazione di Faraday). Quest'ultima non è stata presa in considerazione poiché contribuisce a lunghezze d'onda maggiori di 10 cm, ovvero per frequenze minori di 3 GHz.

Il segno dell'angolo di posizione vero χ_v viene assegnato secondo la convenzione adottata in radioastronomia: come asse di riferimento viene scelto il meridiano passante per l'oggetto osservato, e gli angoli vengono misurati dal Nord celeste verso Est in senso antiorario [10], [11].

L'eq. (14) consente di ricavare il valore dell'angolo γ ; questo dipende dall'assemblaggio della componentistica elettromagnetica nel radiotelescopio e rimane costante durante l'osservazione. In base a come viene definito φ , si assume come riferimento del ricevitore l'asse di polarizzazione della lampada di rumore definito positivo nel quadrante Nord-Est. Esplicitando l'eq. (14) secondo le convenzioni assunte sui segni degli angoli, γ risulta espresso in funzione di angoli noti e misurabili

$$\gamma = \chi_o + PA_{az} - \chi_v - \frac{\varphi}{2}. \quad (15)$$

Scansione	$\chi_o(^{\circ})$	$\chi_v(^{\circ})$	$PA_{az}(^{\circ})$	$\varphi/2(^{\circ})$	$\gamma(^{\circ})$
scan ₁	-49.42±0.39	0	+18.01±0.09	+59.42±0.04	-90.83±0.52
scan ₂	-4.20±0.41	+45	+20.58±0.08	+59.27±0.06	-87.89±0.55
scan ₃	-4.67±0.39	+45	+21.19±0.08	+59.24±0.05	-87.72±0.52

Table 2. Valori dei vari angoli di trasformazione. Sull'ultima colonna si riporta la stima dell'angolo strumentale γ per le tre scansioni.

Dalla tabella 2 risulta che la lampada di rumore, assunta come riferimento dell'angolo strumentale, è posizionata quasi ortogonalmente rispetto al Nord celeste.

5. Conclusioni

Il modello matematico e la procedura di misura descritti in questo rapporto consentono di eseguire una calibrazione semplice ed efficace dei parametri di cross-polarizzazione strumentali. Per il ricevitore utilizzato, si è osservata una differenza di guadagno leggermente maggiore rispetto a quanto desumibile dalle calibrazioni effettuate con la lampada di rumore, ed una cross-polarizzazione spuria di circa -40 dB, compatibile con i dati provenienti dalle osservazioni VLBI. Si sono osservate fluttuazioni di questi parametri nel tempo, che richiedono ulteriori indagini. Campagne di misura ulteriori consentiranno di eseguire un'accurata analisi delle fluttuazioni temporali dei termini di guadagno e di quelli di "cross-talk" tra varie coppie di canali polarimetrici.

6. Bibliografia

- [1] Brand J. Caselli P. Felli M. Mack K.H. Poppi S. Possenti A. Prandoni I. and Tarchi A. 2005 The Sardinia Radio Telescope (SRT), Science and Technical Requirements Report of the SRT Working Group IRA 371/05
- [2] Comoretto G. and Natale V. 2006 A wideband spectrometer for the SRT, Mem. SAIt Suppl. **10** 141-145
- [3] Comoretto G. D'Ambrosi A. Nesti R. Russo A. and Palagi F. 2006 A modular multichannel spectrometer - design study, Arcetri Technical Report 4-2006
- [4] Di Ninni P. 2008 Realizzazione di uno spettropolarimetro per osservazioni radioastronomiche, Tesi di laurea, Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università degli Studi di Firenze
- [5] Nesti R. Cresci L. Curioni P. Lucci L. Pancani G.M. Panella D. and Natale V. 2004 Faraday, Technical report n.FARFI1.02/04
- [6] Kraus J.D. 1986 *Radio Astronomy*, (Cygnus-Quasar Books)
- [7] Tinbergen J. 1996 *Astronomical polarimetry*, (Cambridge University Press)
- [8] Vinyaikin E.N. and Krotikov V.D. 2007 The Moon as a Cosmic Source of Linearly Polarized Radio Emission, Radiophysics and Quantum Electronics **50** 542-554
- [9] Poppi S. Carretti E. Cortiglioni S. Krotikov V.D. and Vinyajkin E.N. 2002 The Moon as a Calibrator of Linearly Polarized Radio Emission for the SPORt Project, AIP Conference Proceedings **609** 187-192
- [10] Hamaker J.P. and Bregman J.D. 1996 Understanding radio polarimetry. III. Interpreting the IAU/IEEE definitions of the Stokes parameters Astron. Astrophys. Suppl. Ser. **117** 161-165
- [11] Hamaker J.P. Bregman J.D. and Sault R.J. 1996 Understanding radio polarimetry. I. Mathematical foundations Astron. Astrophys. Suppl. Ser. **117** 137-147