

R F 光伝送干渉系の基礎実験（その4）

雨谷 純、国森裕生（第6研究チーム）

木内 等（時空計測研究室）、近藤哲朗（関東支所総括主任研究官）

M. R. Sankararaman（タタ基礎研究所、国立電波天文物理センター）

はじめに

R F 信号を光搬送波にのせて直接主局に伝送する電波干渉計に関して、検討を重ね[1],[2]、インド・タタ基礎研究所(Tata Institute for Fundamental Research)・国立電波天文物理センター(National Center for Radio Astro-physics)の Giant Meter-wave Radio Telescope (GMRT)[3]に雨谷、近藤が出張し(2/16-2/22) GMRT 施設を用いた実証実験を行った。前回の談話会で、遅延校正信号によるケーブル遅延の決定に成功したことを報告した[4]。今回、D A Tレコーダに記録した天体電波源の信号の相関処理を行って遅延を求め、位相校正信号を用いてバンド幅合成を試みたので報告する。

また、本方式を通常のV L B Iの遅延校正に応用する方法についても報告する。

実験

前回述べたように、今回の実験の目的は、

- 1) リンク・ロスの確認
- 2) 遅延校正信号の確認
- 3) 干渉計実験

の3つで、1)、2)の結果については、前回報告した。今回は3)について述べる。

干渉計実験は、実際に天体電波源からの信号を受信して得られた信号の相関処理を行い、遅延校正が適切に

表 観測状況

Obs #	date	UT	source	Cal. Freq. MHz	a priori-delay us	a priori-rate ps/s	integration sec
1-a	98/02/21	15:49:00	3C123	311.010	-31.126	46.3	110.0
1-b	98/02/21	15:51:00	3C123	319.010	-31.121	42.6	110.0
1-c	98/02/21	15:53:00	3C123	327.010	-31.116	38.9	110.0
1-d	98/02/21	15:55:00	3C123	335.010	-31.111	35.1	110.0
2-a	98/02/21	16:05:00	3C147	311.010	-36.780	101.1	70.0
2-b	98/02/21	16:08:00	3C147	319.010	-36.762	97.2	110.0
2-c	98/02/21	16:10:00	3C147	327.010	-36.751	94.5	110.0
2-d	98/02/21	16:12:00	3C147	335.010	-36.739	91.9	110.0
3-a	98/02/21	16:26:00	3C161	311.010	-22.088	202.8	110.0
3-b	98/02/21	16:28:00	3C161	319.010	-22.064	198.9	110.0
3-c	98/02/21	16:30:00	3C161	327.010	-22.040	195.0	110.0
3-d	98/02/21	16:32:00	3C161	335.010	-22.017	191.0	110.0
4-a	98/02/22	03:12:00	3C295	311.010	-37.434	-110.1	90.0
4-b	98/02/22	03:16:00	3C295	319.010	-37.461	-115.0	110.0
4-c	98/02/22	03:18:00	3C295	327.010	-37.475	-117.5	110.0
4-d	98/02/22	03:20:00	3C295	335.010	-37.489	-119.9	110.0
5-a	98/02/22	03:49:00	3C295	311.010	-37.728	-153.9	100.0
5-b	98/02/22	03:51:00	3C295	319.010	-37.746	-156.2	110.0
5-c	98/02/22	03:53:00	3C295	327.010	-37.765	-158.5	110.0
5-d	98/02/22	03:55:00	3C295	335.010	-37.784	-160.7	110.0

表中の a priori-Delayはシステム遅延 29.7 μ sec を含んだ値

行えるかどうかを確認するために行った。データはS 2 データレコーダ(S2DR)に記録し、予備的に汎用デジタルデータレコーダ(DDR:TEAC RD-125T)にも記録した。しかしながら、S2DR のデータに関しては、観測時の接続にあやまりがあり、片方の素子のデータしか記録されなかったため解析できなかったため、DDR に記録されたデータについてのみ述べる。DDR の記録帯域幅は 24kHz(48k サンプル/秒)、分解能は 16 bit、65536 階調である。同時記録可能な 4 チャンネルに、それぞれ A 局反射遅延校正信号、B 局反射遅延校正信号、A 局目的信号、B 局目的信号を記録した。遅延校正信号が 10 KHz に落ちるようにローカル周波数を設定し、各電波源に関し、4 つの異なる周波数で観測を行った(表 1 参照)。S 2 レコーダ(帯域幅 32 MHz)での処理を考え、遅延校正信号の注入レベルを通常と同程度(10 kHz バンド幅で C/N 10 dB)としたため、DDR の 24 kHz バンド幅では遅延校正信号の S/N は非常に高い。

観測したのは、4 つの天体電波源(3C123, 3C147, 3C161, 3C295)で、いずれも 300 MHz 帯でのトータルフラックスが 10~100 Jy の強い天体電波源である。観測条件から見積もった相関振幅、遅延決定精度を以下に示す[5]。天体電波源の構造に関する情報が得られなかったため、相関フラックスは 1 Jy とした。

Flux of radio star S = 1 Jy	Antenna aperture A = 1590 m ²
Antenna efficiency η = 0.5	Boltzmann factor K = 1.38E-23
System noise temp. T _{sys} = 110 K	Bandwidth B = 24 kHz
Number of channel N=4	RMS Frequency _{RMS} =8.9 MHz
RF frequency F =323 MHz	Integration time t = 100 sec

Correlation amplitude	$\rho = S A \eta / (K T_{sys} + S A \eta) = .0052$
SNR	$SNR = \rho \text{SQRT}(2 B t) = 11.4$

Error of group delay (single band)	$\sigma = \text{SQRT}(12) / B / SNR = 2.0 \mu \text{sec}$
Error of fringe phase (single band)	$\sigma = 1 / SNR = .088 \text{ rad (5 deg.)}$
Error of group delay (multi band)	$\sigma_{BWS} = \sigma / \text{SQRT}(N) / \text{RMS} = 4.94 \text{ nsec}$
Error of phase delay	$\sigma_{PD} = 1 / SNR / (2\pi F) = 43.2 \text{ psec}$

観測は 5 回行った。各観測は、4 つのセッション(a-d)に分け、観測周波数を変えて約 2 分ずつ(有功積分

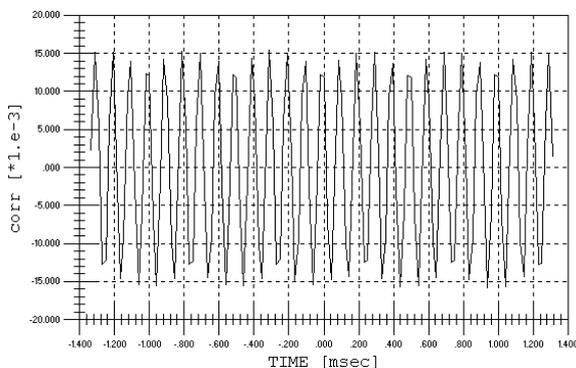


図 1 相互相関関数(実部)の一例
(Obs 2-B)

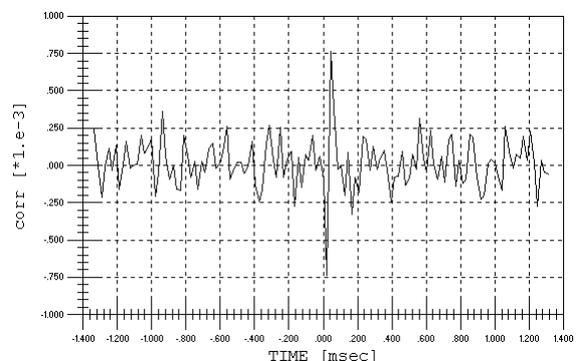


図 2 遅延校正信号の影響を取り除いた後の相互相関関数(実部)

時間は最大 110 秒)データの記録を行った。

解析

DDR に記録されたデータは相関処理装置で処理することができないため、いったん MO にコピーし、計算機で相関処理を行った。

表 1 からわかるように、予測遅延変化率(a priori rate)の最大値は 200 psec 程度なので、100 秒間積分を行ってもビットシフトは起こらない(ビット長 20.83 μ sec)。そのため、通常の相関処理で行われる位相ジャンプ、ビットシフト操作は行わなかった。また、観

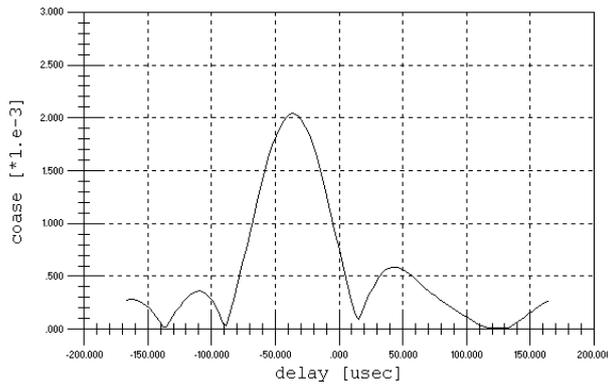


図 3 遅延粗決定関数の一例(Obs 2-B)

測局位置が 1 m 程度の精度で決定されているとすると、予測遅延変化率の誤差は最悪でも 0.2 psec/sec 程度なので、100 秒の相関積分を行っても、320 MHz における位相の誤差はたかだか数度程度である。そのため、積分時間(最大 110 秒)の区間分割は行わず、一括して一定のフリンジ回転を与えて相関積分を行った。

図 1 に相互相関関数の 1 例を示す。遅延校正信号(10 kHz)の相関が大きく入って、目的信号の相関が見えない。このままでは遅延決定が行えないため、相互相関関数の実部、虚部それぞれについて、 $=0$ の周りで、 ± 3 ラグの範囲を除く ± 16 ラグのデータから 10 kHz 信号の正弦成分振幅、余弦成分振幅、オフセットを最小二乗法により推定し、得られた関数を相互相関関数から差し引いた。10 kHz 信号の影響を除いた後の相互相関関数を図 2 に示す。10 kHz 信号が除去されノイズの相関がはっきり確認できる。この相互相関関数を 16 点フーリエ変換し、得られた 8 点の正の周波数点に関する複素スペクトルを用いて遅延粗決定を行った。遅延粗決定関数の一例を図 3 に示す。

各観測の遅延粗決定を行って得られた相関振幅、粗決定遅延の結果を、遅延校正信号の位相差とともに表 2 に示す。電波源 3C123(Obs 1)については、すべての観測について相関が得られなかった。また、他の電波源に関しても、相関振幅(Obs'd Amp)が安定せず、いくつか観測で相関が得られなかったが、得られた相関振幅は相関フラックスを 1 Jy としたときの予測値とほぼ同程度だった。表 2 に示した粗決定遅延の値は表 1 に示した予測遅延と矛盾がない。粗決定遅延(Obs'd Delay)の誤差は、遅延決定に関与した 8 つの周波数点の位相残差から計算したが、予測値とほぼ一致した値が得られた。

さて、遅延校正方法の評価を行うためには、得られた相関位相(Obs'd Phase)に遅延校正信号の補正を加えて、バンド幅合成を行わなくてはならない。遅延校正信号の補正は、前回述べたように通常の遅延校正信

表 2 遅延粗決定結果および遅延校正信号位相

Obs #	date	UT	source	Obs'd Delay μ sec	Obs'd Amp *1000	Obs'd Phase deg	r_pcal(a-b) deg	n_pcal(a-b) deg
2-a	98/02/21	16:05:00	3C147					
2-b	98/02/21	16:08:00	3C147	-36.46 +/- 1.69	2.039	8.9 +/- 4.2	263.3 +/- 4.7	140.9 +/- 1.9
2-c	98/02/21	16:10:00	3C147	-41.67 +/- 2.74	2.684	-64.5 +/- 6.8	316.3 +/- 6.0	302.6 +/- 3.8
2-d	98/02/21	16:12:00	3C147	-36.46 +/- 1.69	3.285	36.0 +/- 4.2	75.4 +/- 2.3	130.9 +/- 4.0
3-a	98/02/21	16:26:00	3C161	-10.42 +/- 6.56	1.012	81.9 +/- 16.4	110.5 +/- 3.8	310.1 +/- 1.6
3-b	98/02/21	16:28:00	3C161	-26.04 +/- 1.33	1.830	-72.1 +/- 3.3	262.3 +/- 3.5	143.2 +/- 1.6
3-c	98/02/21	16:30:00	3C161					
3-d	98/02/21	16:32:00	3C161	-23.44 +/- 4.05	1.106	-57.4 +/- 10.1	79.3 +/- 3.4	131.3 +/- 3.4
4-a	98/02/22	03:12:00	3C295	-39.06 +/- 1.33	1.794	-64.4 +/- 3.3	119.1 +/- 12.4	309.6 +/- 1.9
4-b	98/02/22	03:16:00	3C295	-36.46 +/- 1.59	3.372	51.2 +/- 4.0	277.0 +/- 11.8	133.5 +/- 1.4
4-c	98/02/22	03:18:00	3C295	-39.06 +/- 0.80	4.716	22.8 +/- 2.0	320.1 +/- 5.4	302.1 +/- 3.4
4-d	98/02/22	03:20:00	3C295	-36.46 +/- 1.03	5.622	178.2 +/- 2.6	84.0 +/- 7.9	128.1 +/- 3.4
5-a	98/02/22	03:49:00	3C295					
5-b	98/02/22	03:51:00	3C295	-33.85 +/- 1.07	2.228	-66.4 +/- 2.7	281.6 +/- 7.0	139.4 +/- 1.5
5-c	98/02/22	03:53:00	3C295	-36.46 +/- 1.28	2.927	31.7 +/- 3.2	339.8 +/- 13.1	302.9 +/- 3.5
5-d	98/02/22	03:55:00	3C295	-31.25 +/- 3.38	2.154	-99.8 +/- 8.4	79.0 +/- 7.0	124.0 +/- 3.8

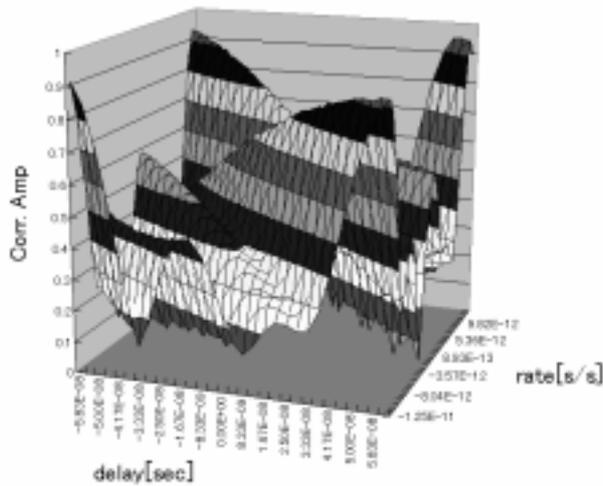


図4 バンド幅合成結果(Obs 4)

表 3 精決定遅延遅延変化率

Obs #	Estimated value	
	Delay [nsec]	Rate [ps/s]
2	-33.3	13.1
3	20.8	-12.5
4	58.3	13.4
5	-45.8	-7

遅延変化率に関しては、得られた値はかなり大きく、10 m 以上の局位置誤差に相当する。また、近接する観測 (obs#4 と obs#5) で大きく異なる値となるなど、信頼性に乏しい。以上のことから、当初の目的である、基線解析を行って遅延オフセットを求めることは断念した。

まとめ、今後の課題

GMRT で行った干渉実験のデータの解析を行った。残念ながら S2DR の記録に失敗したので、予備的に記録した DDR のデータの解析を行った。観測は 4 つの電波源に関し、のべ 20 回行い、そのうち 13 の観測について相関が確認された。それらについてバンド幅合成を行い遅延を求めたが、信頼性に乏しく、基線解析に至らなかった。この原因については、DDR の帯域が不十分であったこと、今回用いた GMRT 素子の位置情報の信頼性が乏しいことがあげられるが、さらに、実験計画の不備があげられる。

今回の実験の主目的が目的 1)および 2)にあり、3)はオプションだったこと、実験準備期間が短かったこともあり、干渉実験に最適な観測周波数、観測時間の設定に関してほとんど検討していなかった。S2DR の記録信号を用いて解析したならば、隣り合った 8 MHz 帯域の位相スペクトルが得られるので、観測位相の信頼性も向上し、今回のような観測周波数、観測時間の設定でもバンド幅合成もうまくいったと考えられるが、不幸にも失敗したため、DDR の解析となった。狭い帯域での信号処理、特殊な配列でのバンド幅合成処理等に、多くの時間を費やし、結局実りある結果が得られなかった。こうした無駄をさけるためにも実験計画は慎重に練らなければいけないことを痛感した。

なお、本方式では偏波分散[6]の影響が取除けないことが判明した。偏波分散は、ファイバー中を伝播する光の遅延が偏波によって異なるために生ずる。本方式では、光をケーブル中を往復させた時、往路と復路の伝播遅延が同じであると仮定しているが、偏波分散によりこの仮定が崩れ、遅延補正に認知不能な誤差が

号の位相差 ($n_{\text{pcal}}(a-b)$) から反射遅延校正信号の位相差 ($r_{\text{pcal}}(a-b)$) の $1/2$ を差し引いたものを、相関位相から差し引いて行った。実験は、通常の VLBI と異なり、複数のチャンネルを同時に観測したのではなく、約 2 分間隔に観測周波数を変化させて行った。そのため、観測位相をそのまま使ってバンド幅合成を行う事ができない。各観測で得られた位相に、予測遅延時間の位相逆回転を与え、遅延 0 に相当する位相に置き直してから、通常

のバンド幅合成の精決定にあたる操作を行った。遅延精決定関数の一例を図 4 に示す。観測の周波数配列、時間間隔がともに等間隔に近く、周波数 - 時間平面状で、観測点がほぼ直線上に並んでいるため、精決定関数の山が通常の精決定関数と比べて広がっており、またサイドローブも大きい。精決定により得られた遅延、遅延変化率を表 3 に示す。遅延に関しては、遅延校正で補正しきれなかった分を含んでいるので、妥当性の評価はできない。

結果(Obs 4)

生ずる。この量は、最大 1 psec/m² と見積もられており、60 km のファイバーを利用した場合、最大 8 psec 程度の誤差を生ずる。

今後、本方式は、通常の VLBI の遅延校正に応用して行く予定である (図 5)。

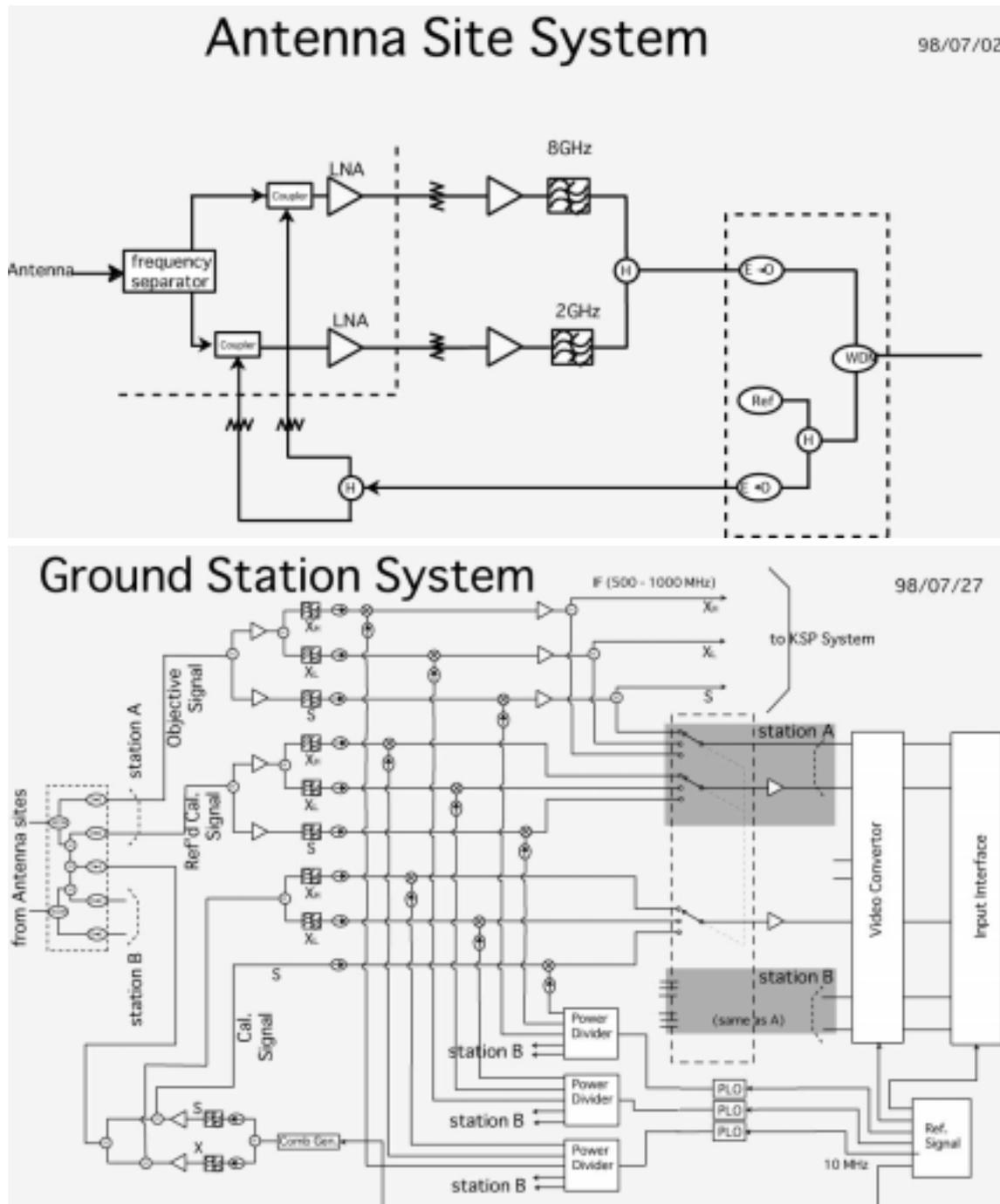


図 5 光遅延校正システム

参考文献

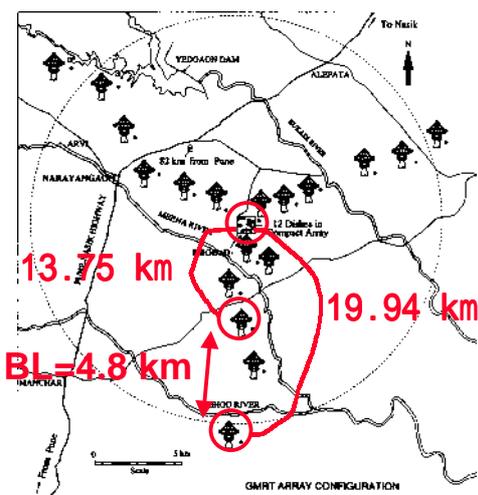
- [1] 雨谷他、「R F 光伝送干渉計の基礎実験」、標準計測部談話会資料、平成 8 年 11 月
- [2] 雨谷他、「R F 光伝送干渉計の基礎実験 (その 2)」、標準計測部談話会資料、平成 9 年 11 月
- [3] Ananthakrishnan, "Giant Meterwave Radio Telescope," Proc. of TWAA, pp90-94, 1996
- [4] 雨谷他、「R F 光伝送干渉計の基礎実験 (その 3)」、標準計測部談話会資料、平成 10 年 4 月
- [5] A. R. Whitney, "Precision Geodesy and Astrometry via VLBI," Doctor thesis of MIT, 1974.
- [6] E. Iannone, et al., "Nonlinear Optical Communication Networks," Wiley-Interscience, New York, 1998.

RF光伝送干渉計の基礎実験 (その4) インド実験しっぱい記(;_;)



雨谷 純、国森裕生 (第6研究チーム)
木内 等 (時空計測研究室)
近藤哲朗 (関東支所総括主任研究官)
M.R.Sankararaman (タタ基礎研究所)

GMRT 45 mアンテナ × 30基



実験の目的



リンク・ロス

信号レベルをスペクトラムアナライザで確認。

遅延校正法

遅延校正信号を観測局と解析局の間で往復させ
遅延を見積もる。

干渉計実験

実際に天体電波源を観測。
遅延校正信号で得られる局内遅延と
クロックオフセットを比較。

実験



- 4つの電波源
3C123, 3C147, 3C161, 3C295

Time [sec]

	0 - 120	120 - 240	240 - 360	360 - 480
Frequency [MHz]				
311.01				
319.01				
327.01				
335.01				

汎用デジタル データレコーダ(予備)



- 帯域 : 24 kHz(48kサンプル/秒)
- 分解能 : 16 bit
- 4 ch同時記録
 - 1ch A局反射遅延校正信号
 - 2ch B局反射遅延校正信号
 - 3ch A局目的信号
 - 4ch B局目的信号

S2レコーダ
記録失敗

観測条件



- Flux of radio star $S = 1 \text{ Jy} \quad ?$
- Antenna aperture $A = 1590 \text{ m}^2$
- Antenna efficiency $\eta = 0.5$
- System noise temp. $T_{\text{sys}} = 110 \text{ K}$
- Bandwidth $B = 24 \text{ kHz}$
- RMS Frequency $F_{\text{RMS}} = 8.9 \text{ MHz}$
- RF frequency $F = 323 \text{ MHz}$
- Integration time $t = 100 \text{ sec}$

遅延決定精度等の予測

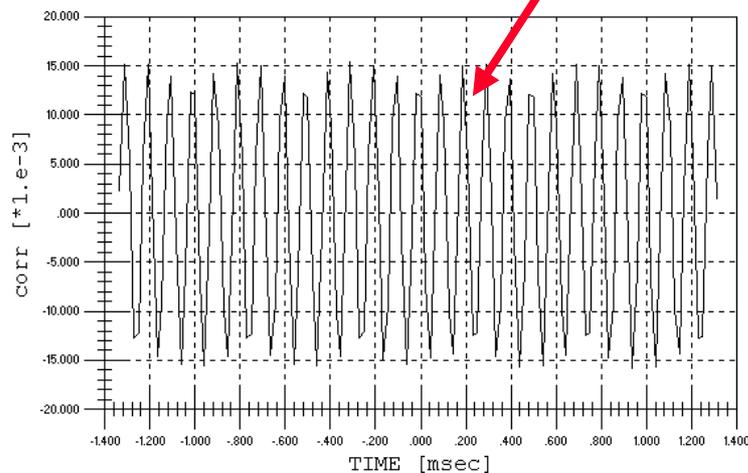


- SNR SNR = 11.4
- Correlation amplitude $\rho = .0052$
- Error of group delay (single band)
 $\sigma = 2.0 \mu \text{ sec}$
- Error of fringe phase (single band)
 $\sigma = .088 \text{ rad (5 deg.)}$
- Error of group delay (multi band)
 $\sigma_{\text{BWS}} = 4.94 \text{ nsec}$

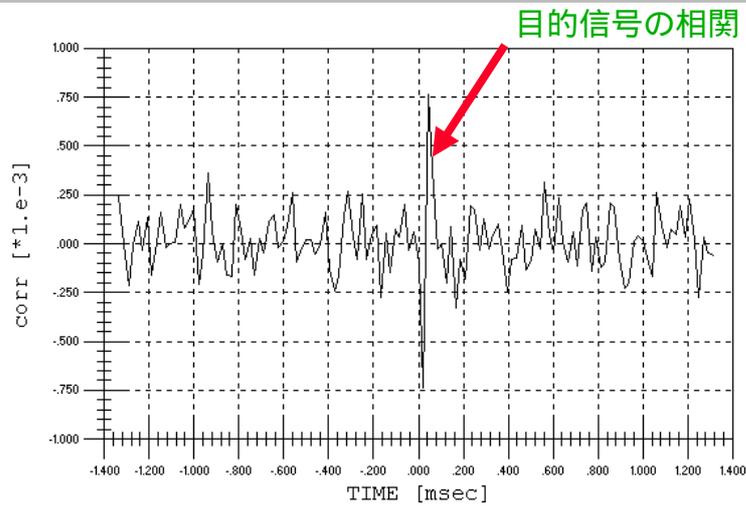
相互相関関数(実部)の一例



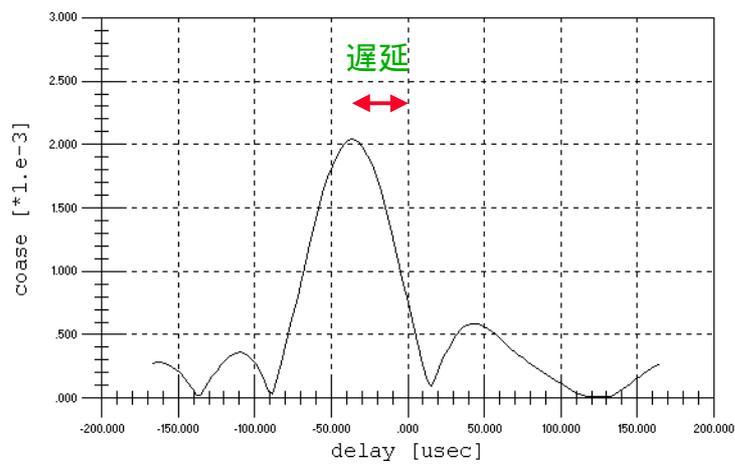
フリッジ回転が少ないため遅延校正信号の相関が大!



遅延校正信号の影響除去後



遅延粗決定関数の一例



遅延粗決定結果および 遅延校正信号位相



Obs #	Obs'd Delay		Obs'd Amp		Obs'd Phase			r_pcal(a-b)			n_pcal(a-b)		
	μsec		* 1000		deg			deg			deg		
2-a													
2-b	-36.46	+/- 1.69	2.039	8.9	+/- 4.2	263.3	+/- 4.7	140.9	+/- 1.9				
2-c	-41.67	+/- 2.74	2.684	-64.5	+/- 6.8	316.3	+/- 6.0	302.6	+/- 3.8				
2-d	-36.46	+/- 1.69	3.285	36.0	+/- 4.2	75.4	+/- 2.3	130.9	+/- 4.0				
3-a	-10.42	+/- 6.56	1.012	81.9	+/- 16.4	110.5	+/- 3.8	310.1	+/- 1.6				
3-b	-26.04	+/- 1.33	1.830	-72.1	+/- 3.3	262.3	+/- 3.5	143.2	+/- 1.6				
3-c													
3-d	-23.44	+/- 4.05	1.106	-57.4	+/- 10.1	79.3	+/- 3.4	131.3	+/- 3.4				
4-a	-39.06	+/- 1.33	1.794	-64.4	+/- 3.3	119.1	+/- 12.4	309.6	+/- 1.9				
4-b	-36.46	+/- 1.59	3.372	51.2	+/- 4.0	277.0	+/- 11.8	133.5	+/- 1.4				
4-c	-39.06	+/- 0.80	4.716	22.8	+/- 2.0	320.1	+/- 5.4	302.1	+/- 3.4				
4-d	-36.46	+/- 1.03	5.622	178.2	+/- 2.6	84.0	+/- 7.9	128.1	+/- 3.4				
5-a													
5-b	-33.85	+/- 1.07	2.228	-66.4	+/- 2.7	281.6	+/- 7.0	139.4	+/- 1.5				
5-c	-36.46	+/- 1.28	2.927	31.7	+/- 3.2	339.8	+/- 13.1	302.9	+/- 3.5				
5-d	-31.25	+/- 3.38	2.154	-99.8	+/- 8.4	79.0	+/- 7.0	124.0	+/- 3.8				

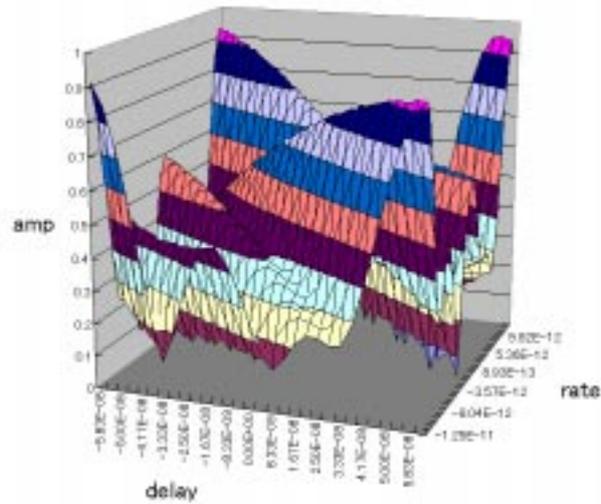
バンド幅合成



- フリンジ位相 = 観測位相

$$- \left(\frac{N\text{-Pcal} - R\text{-Pcal}}{2} \right)$$
- 周波数、観測時刻が違うフリンジ位相
 - - - > 直接バンド幅合成不能
- 予測遅延分のフリンジ逆回転を
 与えてからバンド幅合成
 (通常のVLBIでは、相関処理時に
 予測遅延分が差し引かれている)

バンド幅合成結果(0bs4)



精決定遅延・遅延変化率

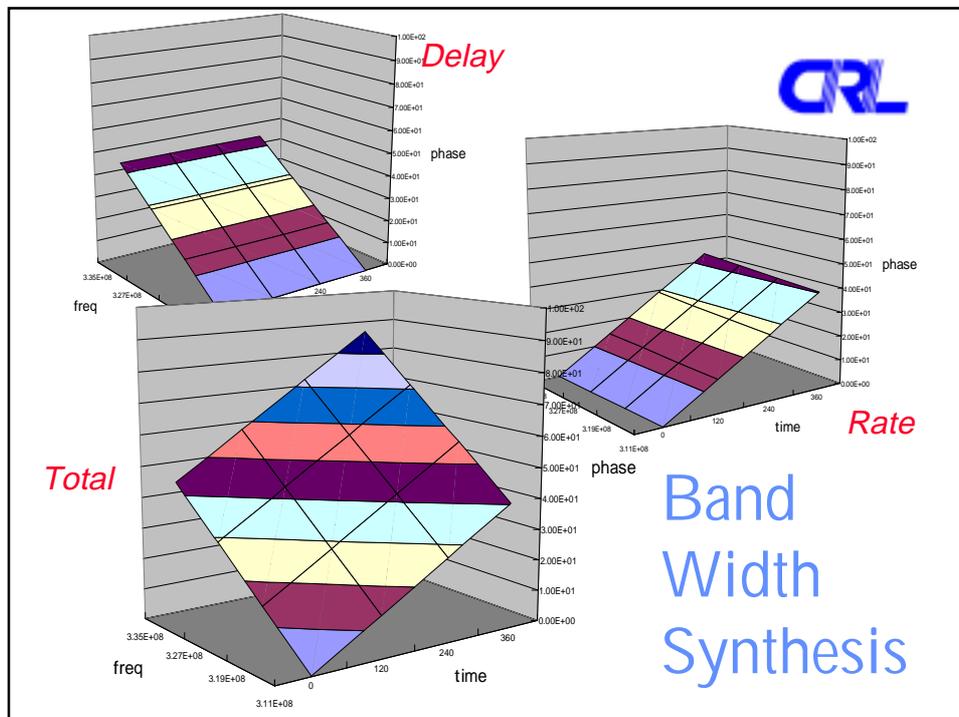


Obs #	Estimated value	
	Delay [nsec]	Rate [ps/s]
2	-33.3	13.1
3	20.8	-12.5
4	58.3	13.4
5	-45.8	-7



まとめ

- 20の観測のうち13の観測で相関確認
- バンド幅合成結果 - - 信頼性低い
原因：実験はオプション
準備期間の不足
不適切な実験計画
(観測周波数・観測時間の設定)



実験



- 4つの電波源
3C123, 3C147, 3C161, 3C295

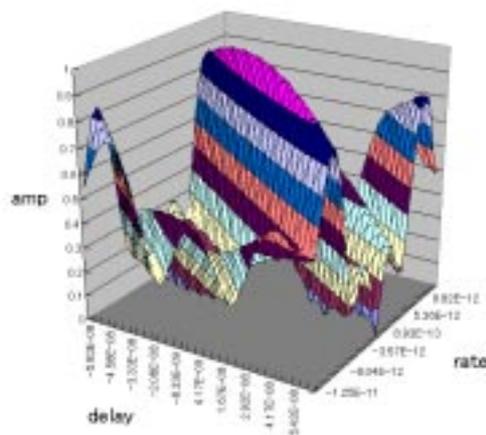
Time [sec]

Frequency [MHz]	Time [sec]			
	0 - 120	120 - 240	240 - 360	360 - 480
311.01				
319.01				
327.01				
335.01				

遅延・遅延変化率0の時 でもこんなかたち・・・



観測周波数・観測時間の設定に問題あり

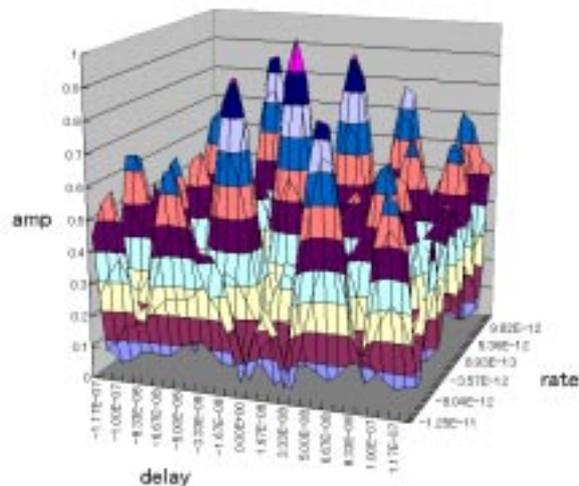


311,335,327,315 MHz 2周期



		Time							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Frequency [MHz]	311								
	315								
	319								
	323								
	327								
	331								
	335								

311,335,327,315 MHz 2周期



311,335,327,315 MHz 3周期



Time

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
311												
315												
319												
323												
327												
331												
335												

Frequency [MHz]

311,335,327,315 MHz 3周期

