

測地 VLBI 技術による 高精度時刻比較

瀧口 博士¹ (htaki@nict.go.jp),
小山 泰弘¹, 市川 隆一¹, 後藤 忠広¹,
石井 敦利^{1,2,3}, Thomas Hobiger¹, 細川 瑞彦⁴

¹ 情報通信研究機構 光・時空標準グループ

² 国土地理院

³ (株) エイ・イー・エス

⁴ 情報通信研究機構

Abstract: 原子泉型周波数標準器及び光周波数標準器の高精度化に伴い、より高精度の新しい時刻・周波数比較技術の開発が望まれている。情報通信研究機構では、測地 VLBI 技術を用いた周波数比較を提案し、比較能力の検証実験を行っている。これまで行ってきた実験と、IVS, IGS データを用いた検証について報告する。

1 はじめに

現在の原子泉型周波数標準器は、数日の平均化時間で 10^{-15} の精度を持つ。更に、開発中の光周波数標準器は、数日の平均化時間で 10^{-16} から 10^{-17} レベルの精度を実現するポテンシャルを持っている [4]。一方、衛星双方向時刻比較や Carrier Phase を用いた GPS 時刻比較の精度は 1 秒の平均化時間で 10^{-10} 、1 日で 10^{-15} レベルである [3]。このレベルの時刻比較精度では、上記高精度の周波数標準器を比較する場合、長い平均化時間を必要とし、また、次世代の周波数標準器を比較するには十分な精度では無い為、より高精度の時刻比較技術の開発が望まれている。

VLBI は、遙か彼方の天体から放射される電波を、複数のアンテナで受信し、その到達時間の差 (遅延時間) を精密に計測している。解析では、観測される遅延時間を、各種物理パラメータと、局の位置、速度、大気遅延と共に、基準局に対する観測局のクロックオフセットを未知パラメータとして、最小二乗法を用いて最適解を得る。この時、推定されるクロックオフセットの推定精度は、国際 VLBI 事業 (IVS) が実施する定常的な測地 VLBI 実験の場合で 20ps 程度が得られており、GPS や衛星双方向時刻比較に比べ高精度の時刻比較の手段として期待できる。

情報通信研究機構 (NICT) では、新しい時刻・周波数比較技術の一つとして、測地 VLBI 技術を提案し、将来の実用化に向け小型 VLBI システムの開発 [1] を進めると共に、現在の測地仕様の VLBI システムでの時刻・周波数比較能力の検証を行っている。本研究では、現在の VLBI システムでの時刻・周波数比較能力の検証を目的とした、VLBI と GPS の比較について報告する。

2 VLBI 時刻・周波数比較と GPS carrier phase 法による時刻・周波数比較との比較

現在の VLBI システムでの時刻・周波数比較能力を検証する為に、同じ基線で測地 VLBI 実験と GPS carrier phase 法による時刻・周波数比較を並行して行い、結果を比較した。最初に、IVS, IGS で行われている定常観測のデータを再解析した結果の比較を行い、次に、NICT 内部の鹿島-小金井基線による検証を行った。

2.1 IVS, IGS データを用いた比較

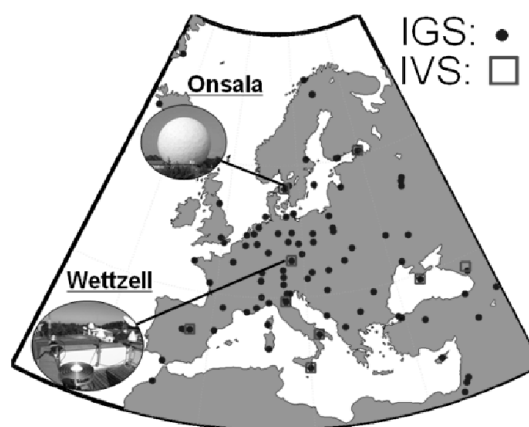


図 1: Map of IVS and IGS stations in Europe.

IVS, IGS ネットワーク両方に所属する、Onsala(onsa) 局 (スウェーデン) と Wettzell(wtzz) 局 (ドイツ) を選んだ (図 1)。両局共に、一つの H メーザーを VLBI と GPS で共有している。使用したデータは、VLBI の方は R1 セッションのデータを、GPS の方は R1 セッションが日を跨いだ 24 時間観測なので、対応する様に 2 日分の RINEX ファ

イルを1つのファイルに編集した物を使用した。使用したデータのリストを表1に示す。なお、2008年以降、Wettzell 局の GPS 受信機が変更された為に安定度が変化したので、比較には使用していない。VLBI, GPS それぞれの解析の詳細を以下に示す。

VLBI

- Software : CALC/SOLVE
- Strategy
 - multi baseline
 - S/X ionosphere-free linear combination
 - reference station: Wettzell
- Estimate
 - station coordinates
 - atmospheric delay / 1h
 - clock offset / 1h

GPS

- Software : GIPSY-OASIS II
- Strategy
 - Precise Point Positioning (PPP)
- Estimate
 - station coordinates
 - atmospheric delay / 5min
 - clock offset / 5min
- Time Difference
 - $clock\ offset\ A - clock\ offset\ B$

Wettzell 局と Onsala 局の時刻差(クロックオフセット)の変動を VLBI, GPS それぞれで求めた結果を比較した。VLBI では、スキャン毎の遅延を基に、1時間毎のクロックオフセットを求めている。この時、全セッションにおける推定誤差は 15ps であった。GPS の結果には、日を跨いだ解析の為に、日の境に不連続(day-boundary discontinuity)が見られる。不連続の大きさの平均は 94ps であった。GPS に day-boundary discontinuity が見られるものの、全体的な変動傾向は VLBI と GPS でよく合っていた ($\pm 200\ ps$)。

周波数安定度を比較した結果を図2に示す。薄い実線が VLBI, 濃い実線が GPS を示す。参考の為に長期間の GPS の結果(黒丸+実線)も示す。短期安定度は VLBI と GPS に差は無いが、 10^3s 以上の平均化時間では VLBI の結果の方が安定であった。また、VLBI の結果は平均化時間 10^3s 以上で、原子泉型周波数標準器の安定度を上回る。全体的に、VLBI の安定度は平均化時間 10^4s まで、 $1/\tau$ に沿った変化を

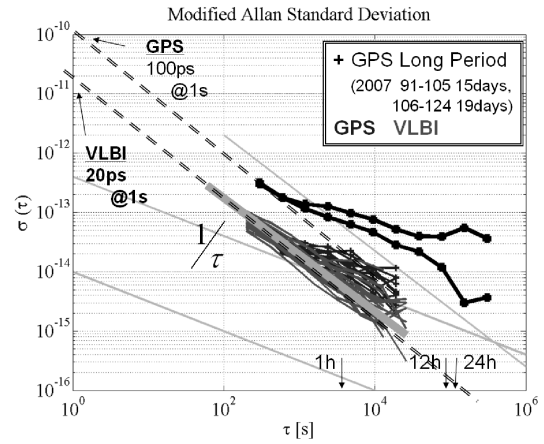


図 2: Modified Allan deviation of VLBI and GPS carrier phase results from all sessions.

示し、1s の平均化時間を見ると、安定度は 2×10^{-11} (20ps) に達する。これらの結果から、測地 VLBI 技術には期待通りの時刻・周波数比較を行える能力があると言える。

2.2 鹿島-小金井基線での比較

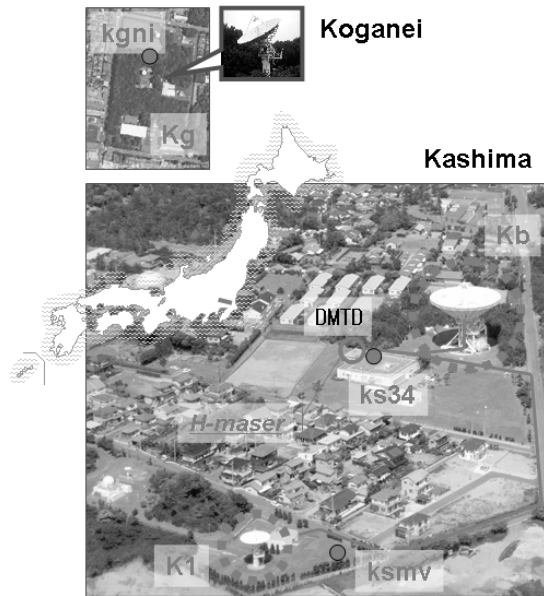


図 3: Layout map of Kashima and Koganei station.

IVS, IGS のデータを用いた検証で、測地 VLBI 技術に期待通りの時刻・周波数比較能力がある事を示す

表 1: The lists of the data used for this study.

VLBI						GPS				
Session	Date	DOY	Time	Duration	Stations	Date	DOY	Time	Duration	Stations
R1258	07JAN09	9	17:00	24	HhKkNyOnTsWfWz	07JAN09	9	-	-	-
R1260	07JAN22	22	17:00	24	KkNyOnTcTsWfWzZc	07JAN22	22	0:00	48	onsa, wtzr
R1262	07FEB05	36	17:00	24	HhKkNyOnShTsWfWz	07FEB05	36	0:00	48	onsa, wtzr
R1263	07FEB12	43	17:00	24	HhKkNyOnShTcWfWz	07FEB12	43	0:00	48	onsa, wtzr
R1265	07FEB26	57	17:00	24	KkMcNyOnTcWfWzZc	07FEB26	57	0:00	48	onsa, wtzr
R1270	07APR02	92	17:00	24	HhKkNyOnShTsWfWz	07APR02	92	0:00	48	onsa, wtzr
R1271	07APR10	100	17:00	24	KkNyOnTcTsWfWzZc	07APR10	100	0:00	48	onsa, wtzr
R1273	07APR23	113	17:00	24	KkMcNyOnTcTsWfWz	07APR23	113	0:00	48	onsa, wtzr
R1274	07MAY02	122	17:00	24	FtHhNyOnTcWzZc	07MAY02	122	0:00	48	onsa, wtzr
R1285	07JUL16	197	17:00	24	HhKkOnWfWz	07JUL16	197	0:00	48	onsa, wtzr
R1291	07AUG27	239	17:00	24	KkNyOnTcTsWfWz-Zc	07AUG27	239	0:00	48	onsa, wtzr
R1292	07SEP04	247	17:00	24	HhKkNyOnTcTsWfWz	07SEP04	247	0:00	48	onsa, wtzr
R1293	07SEP10	253	17:00	24	KkNyOnTcTsWfWz	07SEP10	253	0:00	48	onsa, wtzr
R1294	07SEP17	260	17:00	24	HhKkNyOnWfWz	07SEP17	260	0:00	48	onsa, wtzr
R1295	07SEP24	267	17:00	24	HhKkNyOnTcTsWfWz-Ho	07SEP24	267	0:00	48	onsa, wtzr
R1311	08JAN14	14	17:00	24	BdFtHhNyOnTcWfWz	08JAN14	14	-	-	-
R1312	08JAN22	22	17:00	24	FtHhNyOnTcWfWz	08JAN22	22	-	-	-
R1315	08FEB11	42	17:00	24	FtHhOnTcWfWz-Ny	08FEB11	42	-	-	-
R1316	08FEB19	50	17:00	24	FtHhNyOnTcWfWz	08FEB19	50	-	-	-
R1325	08APR22	113	17:00	24	BdFtHhOnTcWz-NyWf	08APR22	13	-	-	-
R1327	08MAY05	126	17:00	24	BdFtHhNyOnTcWfWz	08MAY05	126	-	-	-
R1334	08JUN23	175	17:00	24	FtHhMaNyOnTcWfWz	08JUN23	175	-	-	-
R1336	08JUL07	189	17:00	24	FtHhNyOnTcWfWz-Bd	08JUL07	189	-	-	-

事が出来た。しかしながら、IVSのデータは24時間観測の為、長期の安定度についてはまだ検証出来ない。そこで、NICT所有のVLBI(鹿島34m, 鹿島11m, 小金井11m)とGPS(ks34, ksmv, kgni: Trimble NetRS)を用いて長期の並行観測を行い結果を比較した。図3に、鹿島-小金井基線のアンテナレイアウトを示す。鹿島34mと鹿島11mアンテナは、同じHメーザーを共有し、鹿島11mへは約300m基準信号を伝送している。また、GPSの方は、それぞれVLBIアンテナ近傍に設置し、VLBIと同じ基準信号を用いている。

鹿島-小金井基線での実験は、2007年以降繰り返し行って来ているが、今回は2008年8月に行った実験の鹿島34m-鹿島11m基線の結果を示す。この実験は1週間以上連続で行った。また、この実験時の鹿島34m-鹿島11m基線では、VLBI, GPSと共にDual Mixer Time Difference (DMTD) 法 [2]を用いた比較も行っている。VLBI, GPS, DMTDの3つの方法で計測された時刻差変動の結果を図4に示す。それぞれオフセット分は取り除いてある。DMTDの結果とVLBI, GPSの結果を比較すると、VLBIの結果は数日程度の変動は良く一致するが、数時間で500psを超えるような変動は追いきれていない。対照的に、GPSの結果は数時間の変動は良く一致するが、day-boundary discontinuityにより、1日以上の比較ではDMTDの結果からオフセットが生じる結果となった、時刻差が数時間で500ps変動する原因

は、鹿島11mアンテナのバックエンド室のエアコンによる温度変化が影響している。VLBIでこの変化を捉えられない原因は、解析上の問題で、解析ソフトウェアの改修により改善するものと考えられる。

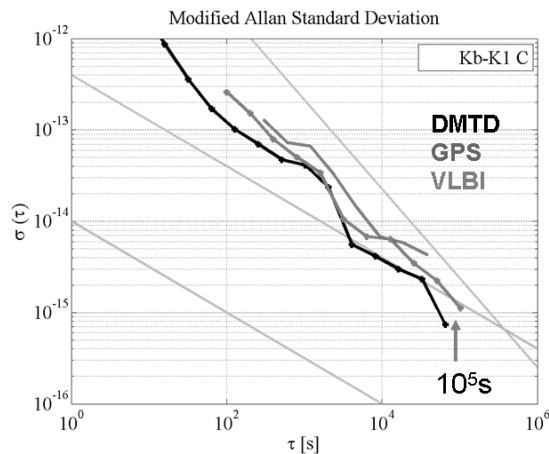


図 5: Modified Allan deviation of VLBI and GPS carrier phase results.

周波数安定度の結果を図5に示す。VLBIの結果は、GPSよりは安定であるが、IVSデータを再解析した結果と比べると長い平均化時間で安定度が低下している。この結果では、 10^5 s以上の平均化時間で原子泉型周波数標準器の安定度を上回る。

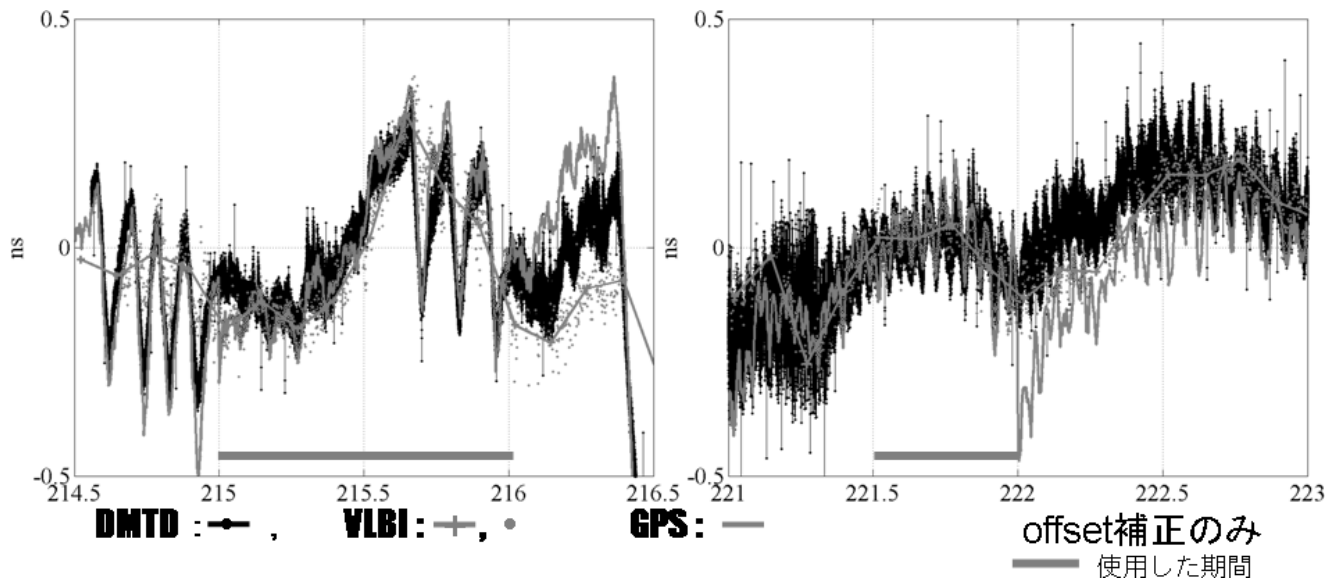


図 4: Time series of the clock difference.

3 まとめ

新しい高精度時刻・周波数比較の手段として測地 VLBI 技術を用いた方法を提案する為に、現在の VLBI システムでの比較能力の検証を行った。IVS, IGS のデータを用いた検証では、VLBI の結果は平均化時間 10^3 s 以上で、原子泉型周波数標準器の安定度を上回り、1s の平均化時間を見ると、安定度は 2×10^{-11} (20ps) に達する結果を得た。これらの結果から、測地 VLBI 技術には期待通りの時刻・周波数比較を行える能力があると言える。

鹿島-小金井基線での実験は、VLBI の結果は、IVS データを再解析した結果と比べると長い平均化時間での安定度が良くない。この場合、原子泉型周波数標準器の安定度を上回るには 10^5 s 以上の平均化時間が必要となる。安定度の低下の原因は、外気温変化の影響である。現在の VLBI システムは測地仕様であるが、今後時刻比較仕様に改修を考えている。その際、システム全体の温度変化の影響を受けない対策を考える必要がある。

2008 年度中には、小型 VLBI システム (MARBLE) 1 号機が完成する予定である。完成後早い時期に、MARBLE を含めた基線での時刻・周波数比較能力の検証実験を行いたい。

参考文献

- [1] Ishii, A., R. Ichikawa, H. Takiguchi, H. Kuboki, M. Kimura, J. Nakajima, Y. Koyama, J. Fujisaku, and K. Takashima, Development of a compact VLBI system for a length examination of a reference baseline, *IVS NICT-TDC News*, No.28, 2-5, 2007.
- [2] Komiyama, B., Frequency and time measurement methods, *Radio Lab Bull*, Vol. 29, 39-53, 1983.
- [3] Ray, J., and K. Senior, Geodetic techniques for time and frequency comparisons using GPS phase and code measurements, *Metrologia*, 42, 215-232, 2005.
- [4] Takamoto, M., F.-L. Hong, R. Higashi, and H. Katori, An Optical Lattice Clock, *Nature*, 435, 321-324, 2005.