

長波標準電波（JJY）の受信信号特性について

○佐藤克久、浅利一善
国立天文台 水沢観測センター

概要

天文台保時室ではこれまで、世界の短波標準電波、VLF、LF、OMEGA 等各種標準電波や航法電波、各種 TV 電波、LOLAN-C 航法電波及び GPS 電波を受信しての時計比較を実施して来た[1]。

1999年6月から送信が開始された長波標準電波（40kHz JJY）は、キャリア信号の位相変動が750km地点で日没時最大変動時に $14\mu\text{s}$ に達する事が報告[2]されている。また、タイムコード復調後の時刻信号による時刻精度については、標準信号発生器型受信機の場合 $\pm 1.5\text{ms}$ [3]、電波伝播遅延を補正した場合で $150\mu\text{s}$ [4]との報告がある。本報告では JJY 信号を実際に受信し、タイムコードとキャリア信号それぞれの特性について検証する。

1 タイムコード復調時刻精度

1.1 JJY タイムコード

JJY は、1Hz のタイムコードを 40kHz もしくは 60kHz の搬送波に 10:1 で AM 変調をかけたもので、1秒を1ビット、60ビット（1分）を1フレームとする、シリアルデジタル信号である。タイムコードは分、時、曜日、通算日（1年）、西暦年、うるう秒情報等をBCDで表現している[5]。

このタイムコードは、図1の様に3種類のデューティ比からなり、20%デューティはマーカー（M）及びポジションマーカ（P0～P5）、50%デューティは2進数の1、80%デューティは2進数の0を表している。また、各ビットの立ち上がりがUTCと同期する様調整されている[6]。

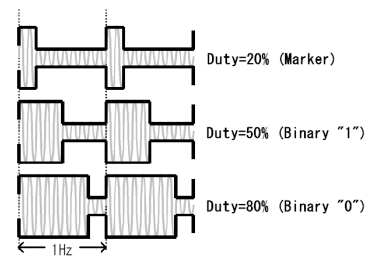


図1. JJY 信号の変調方式

1.2 測定システム

タイムコード復調信号による時刻精度測定には、時刻表示を主な用途とする JJY 受信機の中から、シーデックス株式会社製 2031-B 型日本標準時 40kHz 電波修正時計装置を用いている。時刻表示を主体とする JJY 受信機は、標準信号発生器型受信機と異なり内部回路構成が簡素で、タイムコード復調時の遅延要因がそのまま測定結果に反映するものと思われる。2031-B 型受信機の時刻精度は、JJY 信号の周辺周波数にノイズが殆どない場合の内部精度が $\pm 10\text{ms}$ 以内、受信状態が良好な場合の総合精度が $\pm 30\text{ms}$ 以内[7]となっている。

2031-B 型受信機からは、タイムコード解読後の数値データが RS-232C 経由で出力されるが、本測定では被測定信号として、2031-B 型受信機の搬送波から AM 復調した 1Hz タイムコード信号部分を外部出力として取り出し、この信号の立ち上がりと天文台保時室のマスターセシウム原子時計の 1pps 信号との時間間隔測定を行っている。測定装置の構成を図2に示す。

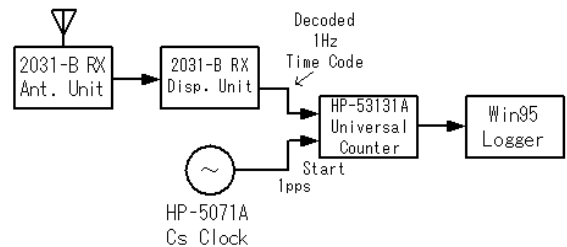


図2. タイムコード復調時刻精度測定装置構成

1.3 時刻精度

JJY 受信機で復調したタイムコードを直接原子時計 1pps と比較し結果を図3に示す。図3から、タイムコード復調時刻精度測定結果には3つの遅延グループが見取れる。最も遅延時間が小さいグループは、平均値 15.12ms 、標準偏差 2.02ms 、次に遅延時間が大きいグループは、平均値 22.02ms 、標準偏差 1.26ms 、そして最も遅延時間が大きいグループは平均値 52.51ms 、標準偏差 2.31ms となっている。遅延時間の平均値は受信回路内の局内遅延と考える事が出来、遅延時間の標準偏差を時刻精度とした場合 $1.26\text{ms}\sim 2.31\text{ms}$ となり、ノイズが殆どない場合の内部精度が $\pm 10\text{ms}$ 以内[7]である 2031-B 型 JJY 受信機の仕様と矛盾しない。

個々の測定データとタイムコードを照合した結果、最も遅延時間が小さいグループは、20%デューティのマーカー（M）及びポジションマーカ（P0～P5）であり、次に遅延時間が大きい

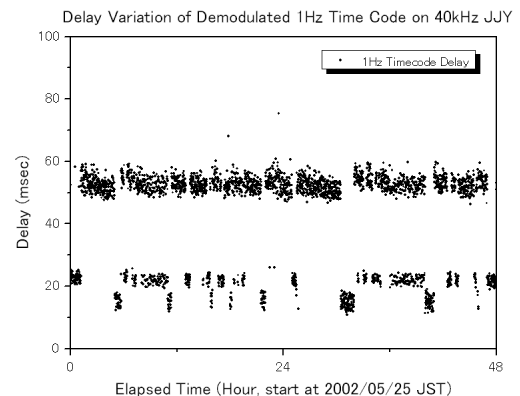


図3. タイムコード復調時刻精度

グループはタ 50%デューティの 2 進数の "1"、最も遅延時間が大きいグループは 80%デューティの 2 進数の "0" である事が判明した。デューティ比の違いにより遅延時間が異なる原因の一つに自動ゲインコントロール (AGC) が考えられる。

一般的な JJY 受信機は図 4 の様な回路構成[8]となっており、1Hz 成分までハイカットした検波出力を AGC 電圧として増幅部へフィードバックさせている。従って、AGC 電圧によるデューティ比毎のゲインコントロールにより、デューティ比毎に異なる振幅となったタイムコードがコード復調部に供給され、復調時の閾値で遅延時間の相違が発生する事が考えられる。デューティ比の違いにより遅延時間が異なる原因については、今後更に検討する必要がある。

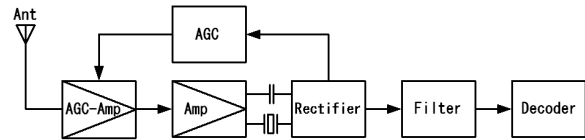


図 4. JJY 受信機回路構成例

2 40kHz キャリア信号特性

2.1 受信システム

40kHz JJY のキャリア信号そのものを被測定信号とするには、40kHz 信号純度を確保する工夫が必要となる。本測定では 40kHz 受信キャリア信号に位相同期 (PLL) した 10MHz の電圧制御水晶発振器 (VCXO) からの信号を被測定信号とする専用受信機を開発[9]している。本受信機には、520kHz 以上の周波数に対して最大 50dB 程度の抑圧性能を持つ、システムゲイン 10dB の長波アクティブアンテナ [10]を接続している。更に、セシウム原子時計の 5MHz 周波数標準出力に合わせるべく、VCXO の 10MHz を分周して 5MHz 正弦波とし出力している。図 5 に開発した 40kHz JJY キャリア信号測定用受信機[9]のブロック図を示す。

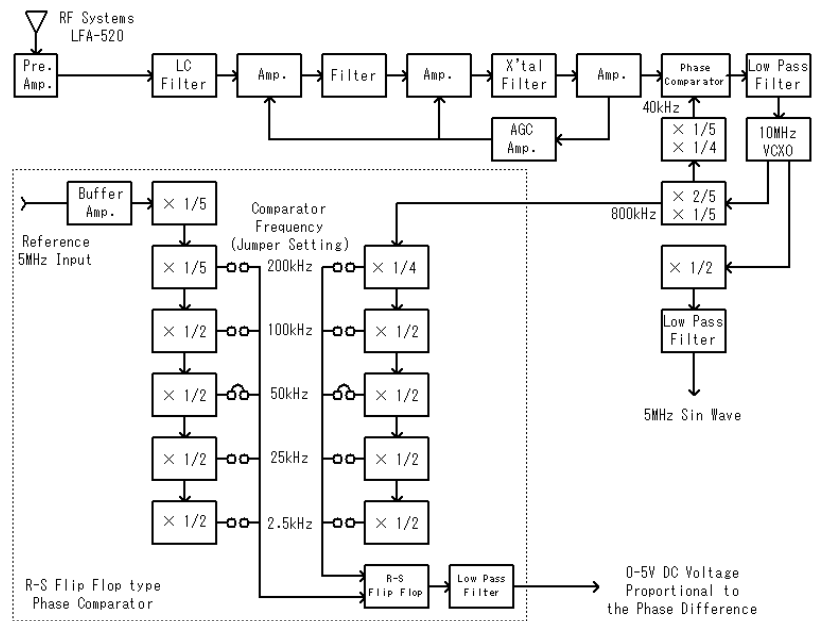


図 5. 40kHz 長波標準電波キャリア信号測定用受信機ブロック図

40kHz JJY キャリア信号の位相変動は、電離層の日変化等の影響により 750km 地点で日没時の最大変動時に $14 \mu s$ に達する事が報告[2]されている。従って一波長が $0.2 \mu s$ となるセシウム原子時計周波数標準からの 5MHz 信号との直接位相比較では $360^\circ \times n$ の不定性が生じる事になる。キロヘルツオーダーの位相比較測定機器を準備出来ない為、本 40kHz JJY キャリア信号測定用受信機では、200kHz、100kHz、50kHz、25kHz、12.5kHz 帯での位相比較を可能とする位相比較器を作り込んでいる。この位相比較器の動作原理は、一部市販のベクトルボルトメータ等にも見られる構成で、R-S フリップフロップ (F.F.) を参照信号と被測定信号でたたき合い、両信号の位相差に比例して F.F. がセットされ、後段で出力信号電圧を平滑化する事により位相差が電圧に変換されるものである。5V 駆動の IC の場合、位相差比例電圧は 0~5V となる。水沢観測センターで受信する JJY キャリア信号位相変動は $20 \mu s$ 以内と予想されるので、位相比較部の比較信号周波数設定は 50kHz としている。受信キャリア信号周波数である 40kHz で直接比較しないのは、40kHz 帯に高利得となっている受信機特性に影響を及ぼさない為である。

2.2 キャリア信号の受信振幅変動

本受信機による 40kHz JJY キャリア信号の受信振幅変動の様子を図 6 に示す。

受信振幅はほぼ 0.66V で、受信機初段増幅段入力 (300K Ω) 換算で約 100mV[9]と考えられる。送信点からの距離が 200km 程度となる水沢での電界強度推定では、地上波が卓越しており

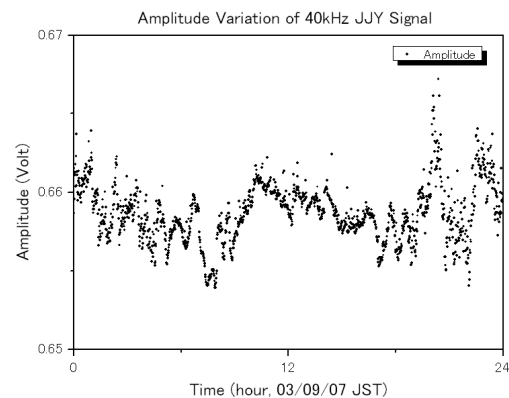


図 6. 40kHz JJY キャリア信号の受信振幅変動

ほぼ日変化は見られないと考えられるが、図 6 の様に数ミリボルトオーダーの微小変化に着目した場合、空間波との合成による電界強度の日変化の存在が確認される。本受信機では、各段の増幅器にキャリア受信信号レベルに対して平均値的な作動となる AGC をかけており、AGC の抑圧により日変化成分が 1/100 オーダーとなっているものと考えられる。この地上波と空間波の合成による電界強度の日変化の様子は、米国の長波標準電波 (WWVB、60kHz) [11]や、図 7 に示す 1966 年から 11 年間継続された千葉県検見川 40kHz 長波標準電波実験局時代に実施された、400km 地点での中距離伝播特性測定に典型的な例が見られる[12]。

図 6 に示す今回の測定結果は、福島県田村郡都路村おおかたどや山から送信されている JJY を受信したもので、水沢までの距離はおおよそ 200km である。一方、図 7 に示す測定結果は 1966 年代の実験局による測定例で、受信点は 400km に位置し今回の約 2 倍の距離がある。従って、直接波と空間波の合成波形は自ずと異なる事になるが、日周変化の傾向は参考になり得る。今後は各増幅段への AGC を切り離し、受信点でのシミュレーション計算に基づく地上波と空間波の電界強度合成波形の観点で、検討を重ねる必要がある。

2.3 キャリア信号の位相変動

本受信機による 40kHz JJY キャリア信号の受信位相変動の様子を図 8 (下段は $1\mu\text{s}$ 下側にオフセット図示) に示す。

図 8 では下段の平穏時と比較して上段は大きな位相変動が見られる。特に、12 時から 20 時にかけての大きな位相遅延は、この間に発生した雷雲によるものと思われる。また、図 8 の平穏時の位相変動には、先の図 7 に示す 400km に位置する受信点での測定例に比して、12 時を境とした対称性が見られていない。夜間の大きな位相変動は、主たる空間波生成要因となる電離層の D 層が夕刻に徐々に消失する事に伴い、消失過程で D 層高度が変化しそれによって空間波の反射点が遷移し、受信点での地上波と空間波の合成ベクトル位相が回転していく事に起因している[12][13]。また、明け方はこれと反対の現象が起こっていると思われる。図 8 では、何らかの要因で夕方に発生すると予想される電離層 D 層の消失過程が水沢の様な 200km 受信点では反映されにくい状況を示唆している。今後は、受信点での試算に基づく地上波と空間波のベクトル位相合成の観点で、検討を重ねる必要がある。

2.4 キャリア信号の周波数変動

本受信機では 40kHz 受信キャリア信号に PLL 同期した 10MHz の VCXO の信号を分周して 5MHz 正弦波を得ているが、この 5MHz 信号の周波数を測定し JJY 準拠標準信号発生器としての評価を試みた。周波数安定度は、位相変動を時系列サンプリングして評価する方法が一般的であるが、周波数を直接時系列にサンプリングして測定した場合、 $\Delta f/f_0$ を規格化された周波数変動分 $y(t)$ と見なし τ 秒平均のアラン分散 (ASD) として評価する事になる[14]。アラン分散評価には、連続サンプリングによる 2 標本分散の推定法 (τ 重複サンプリング) [15] を用いている。

図 9 に、アラン標準偏差の様子を示す。図 9 から、安定度の全体的な傾向として、セシウム原子時計同士の直接信号比較に比してセシウム原子時計固有の安定度から一桁劣化しており、送信局側及び受信機機器による擾乱や電波伝播空間の伝達関数的な揺らぎの重畳の度合いを示している。また、10 秒積分付近に顕著な安定度の劣化が見られ、AM ラジオ放送の影響を回避する目的の受信機初段挿入の 100kHz のパスフィルタや 100 秒の PLL 時定数でフィルタリングされている事を考えると、この原因として自然界の現象が考えられる。自然界の現象とした場合、大気水蒸気の位相変動が 10 秒を超える付近までフリッカー位相雑音となる[16]事が示されており、今後関連性を検討する。

Characteristics of JG2AS 40kHz Received Signal at 400km Point

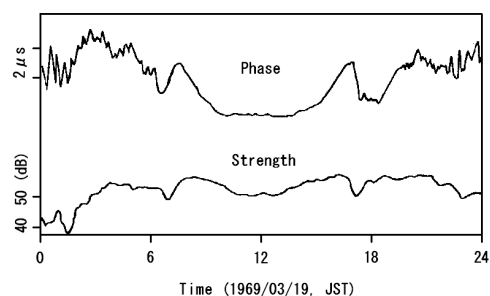


図 7. 千葉県検見川 40kHz 長波標準電波実験局時代の 400km 地点での中距離伝播特性

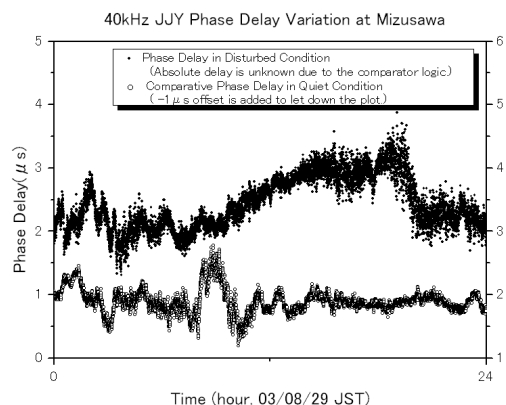


図 8. 40kHz JJY キャリア信号の受信位相変動

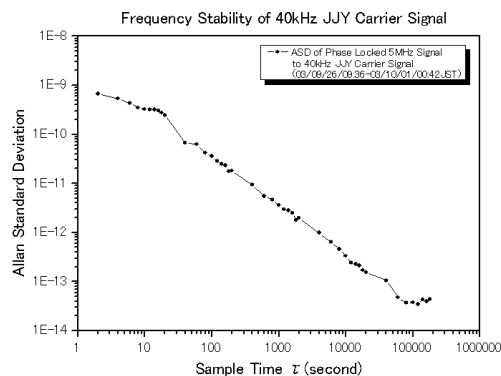


図 9. キャリア信号の周波数安定度

また、積分時間 70,000 から 80,000 秒付近の安定度劣化は電離層 D 層の日変化の影響よると考えられる。

3. まとめ

1999 年 6 月から送信が開始された、JJY (40kHz) のキャリアの位相変動や周波数変動を検証すべく、時刻表示を主な用途とする JJY 受信機及び、40kHz 受信キャリア信号に PLL 同期した 10MHz VCXO からの信号を被測定信号とする専用受信機を開発して JJY 信号を実際に受信し測定した。

タイムコード復調による時刻精度測定結果では、遅延時間の平均値が受信回路内の局内遅延とみなし遅延時間の標準偏差を時刻精度とした場合、タイムコードの大半を占める最も遅延時間が大きいグループの標準偏差で 2.31ms となることが判明した。また、電界強度測定からは空間波との合成による電界強度の日変化の存在が確認され、送信点から 200km 程度離れている水沢では地上波が卓越しておりほぼ日変化は見られないとする考え方との相違が見られた。

40kHz キャリア信号の位相変動測定では、夕方に発生すると予想される電離層 D 層の消失過程が 200km 受信点では何らかの要因で反映されにくい状況がある事を示唆する結果となった。

40kHz キャリア信号の周波数変動測定ではラン分散評価の結果、20 秒積分付近に顕著な安定度の劣化が見られ、大気水蒸気の位相変動が 10 秒を超える付近までフリッカー位相雑音となる事との関連性が興味深い。

今回の 40kHz JJY キャリア信号専用受信機の開発に際し、(有) トウロッシュの奥山雄司氏から回路の提案や受信機製作など、多大なご協力を頂いた。また、カシオ計算機株式会社時計開発部の佐野貴司氏からは、長波標準電波の電界強度推定値に関する貴重な情報を頂いた。ここに記して深謝致します。

参考文献

- [1]堀合幸次他：水沢における経度観測史（時刻観測）、緯度観測 100 年、47-51,1999.
- [2]高木克彦：JJY 受信機の開発とその応用、長波標準電波シンポジウム集録、30-31,2001.
- [3]エコー計測器株式会社、LT-200 長波 JJY 標準時刻信号発生器カタログ
- [4]日本通信機株式会社、7572B JJY Time Tracking Receiver カタログ
- [5]森川容雄：通信総合研究所の時間・周波数と標準電波、長波標準電波シンポジウム集録、1-5, 2001.
- [6]木下雅貴：電波時計受信用 LSI の開発、長波標準電波シンポジウム集録、22-25,2001.
- [7]シーデックス株式会社、JST2000 シリーズカタログ (<http://www.c-dex.co.jp/>)
- [8]佐藤貴司：電波時計への取り組みと今後、長波標準電波シンポジウム集録、17-21,2001.
- [9] (有) トウロッシュ、電波伝播遅延観測用 JJY 受信機取扱説明書 (<http://www.troche.com/>)
- [10]RF systems：長波アクティブアンテナ LFA-520 カタログ (<http://rfsystems-japan.com/>)
- [11]Deutch, M. et. al., "WWVB Improvements: New Power from An Old Timer," In *Proc. PTTI Applications and Planning Meeting*, 523-536, 1999. (<http://www.boulder.nist.gov/timefreq/general/pdf/1406.pdf>)
- [12]本間重久、斎藤義信,"長波標準電波(JG2AS/JJF-2)による供給,"電波研究所季報, Vol.29, No.149, pp. 279-289, Feb. 1983.
- [13]越前谷喜松、竹内鉄雄、中村幸三郎、森哲造,"長波(40kHz)の中距離伝播特性(1),"電波研究所季報, Vol.18, No.95, pp. 257-261, Mar. 1972.
- [14]Lombardi, Michael A., "An Introduction to Frequency Calibrations," NIST (National Institute of Standards and Technology) Frequency Measurement Analysis System: Operator's Manual, NISTIR 6610, 2001. (<http://www.boulder.nist.gov/timefreq/service/pdf/calibrations.pdf>)
- [15]吉村和幸、古賀保喜、大浦宣憲：周波数と時間、1989.
- [16]原忠徳他：位相モニタによる大気位相ゆらぎ測定、「VERA で明らかにする宇宙」研究会集録、207-209, 1999.