

電波時計を用いた長波標準電波 JJY のタイムコードの 遅延時間に関する検討

Study on JJY time-code's Delay-time by using Radio Controlled Clock

大沼 靖治*・吉村 和昭**・倉持 内武**

* 桐蔭横浜大学大学院工学研究科修士課程情報・機械工学専攻

** 桐蔭横浜大学工学部電子情報工学科

(2008 年 3 月 15 日 受理)

キーワード: 長波標準電波 JJY、遅延時間、パルス幅、時刻信号、電波時計、時刻比較、シミュレーション、タイムコード

Keywords: JJY, delay-time, pulse-width, time-signal, radio controlled clock, time comparison, simulation, time-code

1. はじめに

長波標準電波 JJY は周波数の標準、並びに協定世界時 (UTC) に基づく日本標準時 (JST) を広く国の内外に知らせるために、独立行政法人情報通信研究機構 (NICT) によって運用されている電波である。

平成 11 年 6 月 10 日より長波帯標準電波施設 (福島局、周波数: 40kHz) が運用開始され、従来の実験局 (JG2AS) から正式な標準周波数局 JJY として運用し、平成 13 年 10 月 1 日より 2 局目となる長波帯標準電波施設 (九州局、周波数: 60kHz) を運用している。表 1 に諸元を示す。送信されている電波は非常に高い周波数精度を持っているために周波数較正に用いられているが、その利用例の多くは電波時計の時刻較正用である。

電波時計は日に数回標準電波を受信し、時刻較正を行なっているため、10 万年に 1 秒

表 1. 標準周波数局の諸元

所在	福島県 大鷹鳥谷山	佐賀県 羽金山
送信周波数	4 0 k Hz	6 0 k Hz
空中線電力	5 0 k W (実効輻射電力 1 0 k W)	
空中線形式	傘型 2 5 0 m 高	傘型 2 0 0 m 高
周波数精度	$\pm 1 \times 10^{-12}$	

しか誤差が生じないといわれている。その利便性と時を正確に刻むという信頼性のため時刻表示器としての性能が高く、普及が拡大している。

時刻表示器として使用される電波時計の信頼性は前述の通り十分であるが、長波標準電波 JJY が電波時計で復調されたときの性質、遅延量等は具体的には明らかになっていない。

本報告は、GPS 受信機の 1pps 信号を基準信号に用いて電波時計で復調された長波標準電波 JJY の各パルスに 1 秒毎に時刻比較し遅延時間を求め、その性質について検討して

いる。電波時計で復調された JJY のタイムコードの遅延時間を桐蔭横浜大学で5年間連続して測定している。今回は東京都新島村でも測定を行い、距離の変化によって遅延時間がどのように変動するのかを検討する。又、遅延が発生する原因と考えられる AGC 回路の復調時における働きをシミュレートし、そこで発生している遅延量の推定を行う。

2. タイムコード

長波標準電波 JJY には時刻情報を知らせるためのタイムコードが重畳されている。タイムコードには1分間の中に時刻、通算日、年数などの様々な情報が含まれており、1分間を1フレームとして送信されている。1分間の中には60個(60ビット)のデータ列があり、0.2sパルス(ポジションマーカー)、0.5sパルス(2進数の1)、0.8sパルス(2進数の0)の3種類のパルスで各情報を識別している。図1に通常時のタイムコードを示す。

通常のタイムコードは時、通算日、年(西暦下2桁)、曜日、うるう秒情報、時分に対応したパリティビットを送信している。時間は24時間制日本標準時、通算日は1月1日を1とした場合の積算数である。毎時15分、45分40秒から9秒間は無線局を識別するための文字列の呼び出し符号 JJY がモールス符号で重畳されている。

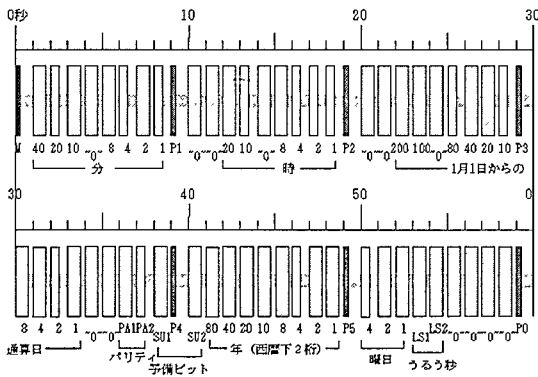


図1. 通常時のタイムコード (NICTのホームページより引用)

3. 遅延時間測定方法

図2に遅延時間測定のプロック図を示す^{[2][3]}。GPSの1pps信号を基準信号に用いて、JJYの各パルス信号をタイムコンパレータで時刻比較している。計測されたデータはRS-232Cを通してパソコンに出力している。実験に使用する電波時計はTristate社製のTS-JJY01である。外観を図3に示す。

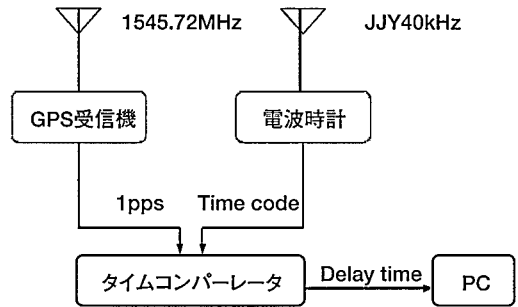


図2. 遅延時間測定実験のプロック図

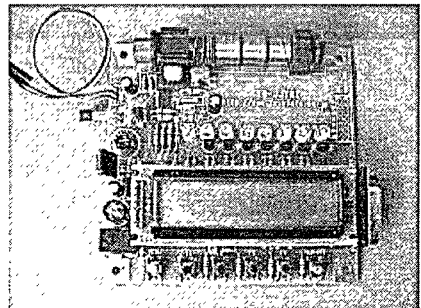


図3. TS-JJY01

4. 測定地点

測定を行う地点は図4と表2に示す地点である。送信局から横浜測定点、送信局から新島測定点の距離の差は約100kmである。送信局からの距離の違いが遅延時間にどのような差を生じさせるかについても検討する。送

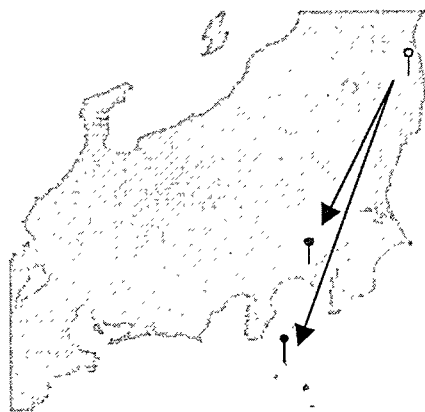


図4. 測定地点の簡略図

表2. 送信局と受信点の距離

	所在地	送信局からの距離
送信局	福島県大鷹鳥谷山	
受信点1	桐蔭横浜大学	約221km
受信点2	東京都新島村	約323km

信局から横浜受信点までの電波の伝搬時間は約 0.74ms、新島受信点までの伝搬時間は約 1.08ms、横浜受信点と新島受信点の電波の伝搬時間の差は約 0.34ms である。

5. 横浜受信点における測定結果

2007年7月10日に測定した結果のうち JJY の電波が安定している 00:00:00 ~ 1:00:00 のタイムコードの遅延時間を図5に示す^[1]。

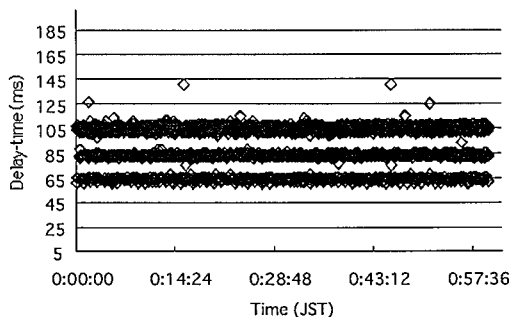


図5. タイムコードの遅延時間 (横浜)

横浜受信点で測定した遅延時間は、100ms、80ms、60ms の付近で3層に分かれて分布していることが確認できる。3層から離れている点の殆どは GPS の 1pps 信号と同期がとれない、JJY のモールス信号の伝送と思われる。 00:00:00 ~ 1:00:00 までの1時間の平均値と標準偏差を表3に示す。

表3. 遅延時間と標準偏差 (横浜受信点)

パルス幅	遅延時間と標準偏差 (ms)
0.8s pulse	104.63 ± 1.64
0.5s pulse	82.77 ± 1.08
0.2s pulse	64.04 ± 1.52

(2007.7.10 00:00:00~01:00:00)

送信局から横浜受信点までの電波伝搬時間は約 0.74ms である。各パルスの遅延時間は数十 ms から 100ms 以上の値を示しているため遅延時間が発生する要因は電波時計内部の信号処理部が関係している可能性が高い。また、遅延時間の特徴として、0.5s パルスのばらつきが一番小さく、0.8s パルスが最も不安定な挙動を示す傾向があることが分った。

6. 新島受信点における測定結果

2008年1月10日に測定したうち 02:00:00 ~ 03:00:00 のタイムコードの遅延時間を図6に示す。

新島受信点で測定した遅延時間のばらつき

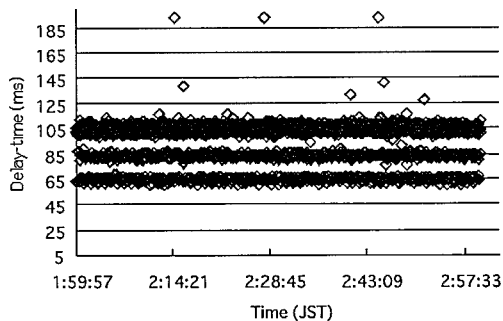


図6. タイムコードの遅延時間 (新島)

は横浜受信点の遅延時間結果より3種類のパルス共に大きくなっている。その原因は送信点からの距離が100km遠くなり電界強度が弱くなったこと、新島で運用されている周波数100kHz、出力1600kWのLORANの影響も考えられる。02:00:00～03:00:00までの1時間の平均値と標準偏差を表4に示す。

新島受信点における遅延時間の平均値は横

表4. 遅延時間と標準偏差 (新島受信点)

パルス幅	遅延時間と標準偏差 (ms)
0.8s pulse	104.84±2.29
0.5s pulse	83.23±1.50
0.2s pulse	64.86±1.58

(2008.1.10 02:00:00～03:00:00)

浜受信点と比べて若干の違いがあり、0.8sパルスが0.21ms、0.5sパルスが0.46ms、0.2sパルスが0.82ms大きくなっている。標準偏差も同様に横浜受信点の測定値よりも大きく、その値は最小で0.06ms、最大で0.65ms程になった。

横浜受信点と新島受信点の距離の差100kmにおける伝搬時間は約0.3msである。0.8sパルスはその値を下回っているが他の2つのパルスはそれ以上の値を示しているため、伝搬時間以外の原因が考えられる。

7. 遅延時間の分布

遅延時間測定実験から各パルスの遅延時間の平均値と偏差が分ったが、1時間の中でどのように遅延時間が分布しているのかを確認するため各パルスの遅延時間の分布図を作成した。分布図を作成するのに使用したデータは2007年7月10日00:00:00～01:00:00(横浜受信点)と2008年1月10日02:00:00～03:00:00(新島受信点)である。図7～12に各パルスの分布図を示す。

1時間に伝送される各パルスは、0.8sパル

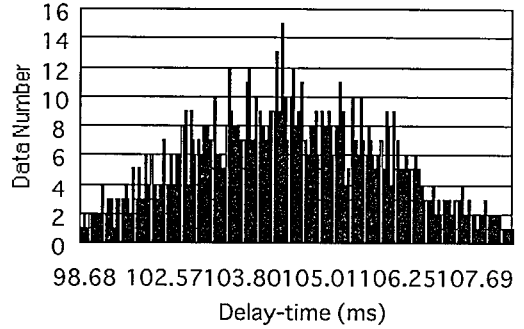


図7. 0.8sパルスの分布図 (横浜)

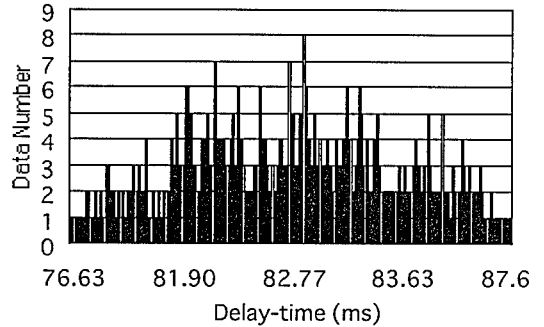


図8. 0.5sパルスの分布図 (横浜)

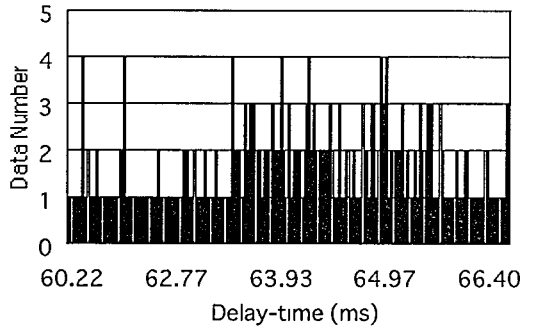


図9. 0.2sパルスの分布図 (横浜)

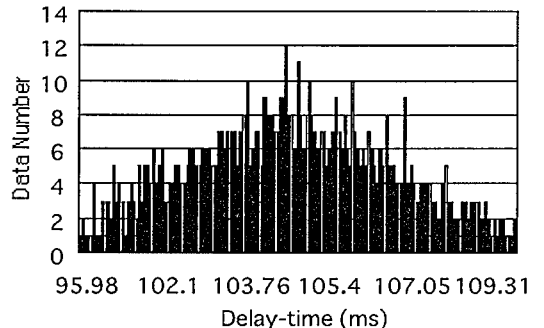


図10. 0.8sパルスの分布図 (新島)

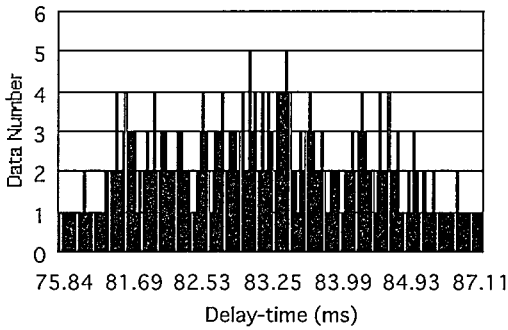


図 11. 0.5s パルスの分布図 (新島)

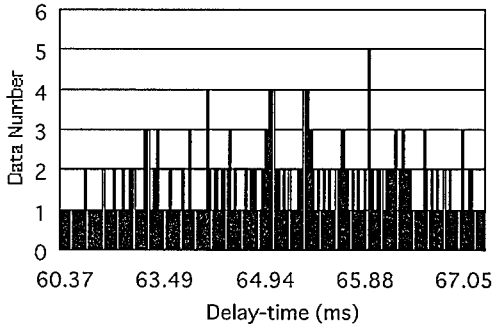


図 12. 0.2s パルスの分布図 (新島)

スが約 2400 個、0.5s パルスが約 780 個、0.2s パルスが 420 個である。

横浜受信点と新島受信点のいずれの遅延時間も同様な傾向を示している。

8. 内部遅延のシミュレーション

遅延時間の発生及び変動の原因の一つに自動利得制御回路 (AGC 回路) が関係していると考えられる。そのため AGC 回路の振る舞いをシミュレートし、その遅延時間の推定を行なった。狭帯域フィルタに理想的なパルス波を加えた場合の出力波形を求めた。パルスの伝送形態に 9 種類の形態があるが、ここでは 0.8s パルスの後に 0.2s パルス、0.5s パルス、0.8s パルスが続く場合を再現した^{[1][4]}。

いずれのパルスも繰り返し周期は 1s である。出力電圧はパルス幅の時間までは (1) 式で表され、図 13 に示すように電圧が上昇

(斜線部) していく。

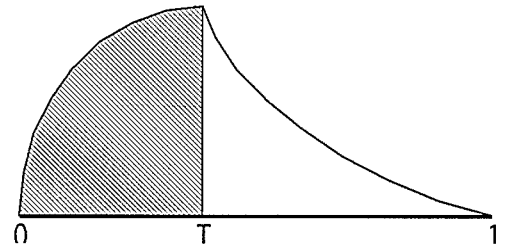


図 13. 出力波形の概略図 (上昇時)

$$E_{up} = E \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right) \cdot \sin 2\pi f_c t \cdots \cdots (1)$$

$$0 \leq t \leq T$$

(ただし、 E は振幅、 f_c は搬送波の周波数、 T はパルス幅、 R 及び L はフィルタの定数を表す。)

パルス幅の時間から 1s までの出力電圧は (2) 式で表され、図 14 に示すように電圧が下降 (斜線部) していく。

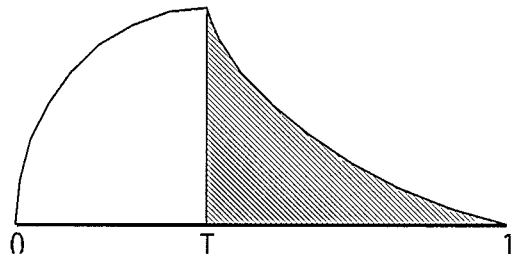


図 14. 出力波形の概略図 (下降時)

$$E_{down} = E \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right) \cdot e^{-\frac{R(1-t)}{L}} \cdot \sin 2\pi f_c t \cdots \cdots (2)$$

$$T < t \leq 1$$

AGC 回路は信号振幅を一定に保とうとするため後に来る信号の振幅を前の信号の振幅値に増幅する機能を持つ。シミュレーションでは最大振幅が 1 のパルス信号が発生した場合、次に発生する信号の最大振幅が 1 に満たない場合に 1 になるように増幅し、信号全体も同じように等倍している。

0.8s パルスを基準とするシミュレーションの波形図を図 15、図 16、図 17 に示す。

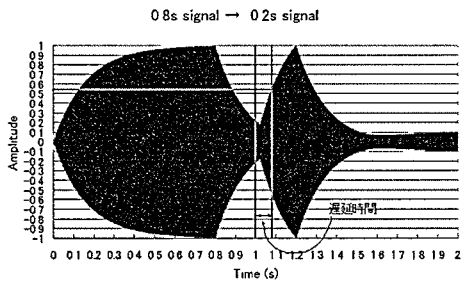


図 15. シミュレーション (0.8s → 0.2s)

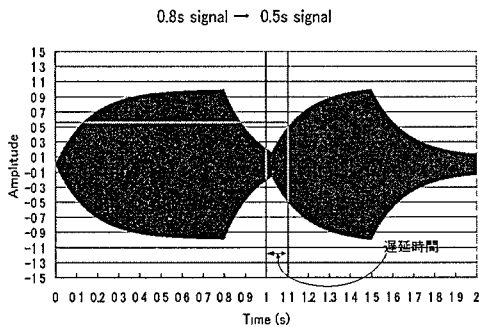


図 16. シミュレーション (0.8s → 0.5s)

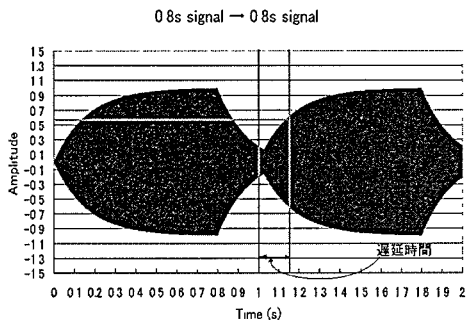


図 17. シミュレーション (0.8s → 0.8s)

一般にパルスの立ち上がりは信号振幅の 55% 値で示されている。図 15～図 17 では 2 本の縦線の間が遅延時間ということになる。

シミュレーションによる波形は AGC 回路の働きによって後に来る信号の振幅が増幅されている。実際の電波時計内部ではパルスの

立ち上がり位置の 55% 値が常に変化するため、測定される遅延時間が同じ値を示さないのではないかと考えられる

9. 結論

本研究で行なった実験を通して得られた結果より以下のことがいえる。

1. 横浜受信点と新島受信点における各パルスの遅延時間の平均値と標準偏差の差は表 5

表 5. 横浜受信点を基準とした遅延時間の平均値及び標準偏差の差

パルス幅	平均の差	標準偏差の差
0.8s pulse	+0.21ms	+0.65ms
0.5s pulse	+0.46ms	+0.42ms
0.2s pulse	+0.82ms	+0.06ms

のようになった。

平均値の差はパルス幅が狭まるにつれてその差が大きくなっているのが分かる。標準偏差では逆にパルス幅が広くなるにつれてその差が小さくなっている。

各パルスとも送信局からの距離が長くなると遅延時間と標準偏差の上昇が確認できた。データ数が少ないため確定的ではないが、送信局からの距離の変化、つまり電界強度の変化によって遅延時間とそのばらつきに影響を与えることが考えられる。

2. 遅延時間の分布図から分布特性は各パルスとも同じではなく、パルス幅が狭まるにつれてその分布は均等に分布していることが分った。

3. 電波時計で使用されている狭帯域フィルタを通過したパルス出力のシミュレーション結果から、内部で発生する遅延時間の特性は AGC 回路が大きく関係している可能性があるとして予測される。また、AGC 回路が働くことによって発生する遅延量の推定は表 6 のよ

表6. 推定値と実測値の比較

パルス幅	推定値 (ms)	実測値 (ms)
0.8s pulse	約 150	約 100
0.5s pulse	約 110	約 80
0.2s pulse	約 90	約 60

うになった。

シミュレーションによる推定値と実測値には最大で約 50ms の違いがあるが、今回行った実験は擬似的にパルス信号を発生させているため実際の電波時計内部ではパルスの立ち上がり位置である 55% 値がシミュレーションよりも早い段階で 55% 値まで達していると考えられる。また、各パルスの遅延時間の推定値より JJY 信号の復調時に発生する。遅延時間の大部分は電波時計で使用されている狭帯域フィルタ（水晶フィルタ）と AGC 回路が関係していると考えられる。

参考文献

- [1] 大沼靖治、吉村和昭、倉持内武：「長波標準電波のタイムコードの遅延時間測定」、第 68 回応用物理学会学術講演会、講演予稿集 No.1,p-211,7p-V-8, 2007. 9
- [2] 山下貴史：「電波時計を使用した長波標準電波 JJY の計測に関する研究」桐蔭横浜大学平成 17 年度修士論文, 2006. 3
- [3] 吉村和昭、倉持内武、安田明生：「電波時計によるタイムコードの遅延時間とパルス幅」電気学会 ECT-04-59 pp,13-18, 2004. 9
- [4] Yasuharu ONUMA, Kazuaki YOSHIMURA, Naimu KURAMOCHI 「Measurement of Time-code's Delay-time from JJY stations by using Radio Controlled Clock」Toin International Symposium on Biomedical Engineering 2007, 2007. 11