

## Detecting Voyager 1 signal in CT1DMK's wave file

### — Consideration on frequency stability

## CT1DMK による受信録音からの Voyager 1 信号の検出

### — 周波数安定度についての考察

CT1DMK の受信録音に対して G3RUH の解説に従った信号処理を施したところ、両者の検出結果と同等の Voyager 1 信号を検出できた。そこには二つの重要なポイントがあることに気づいた。[1] 信号処理におけるフロントエンドとバックエンドである。フロントエンドである CT1DMK の受信設備の優秀さは、

- 高い G/T と、その安定度
- 周波数安定度
- 高精度かつ高安定度なアンテナ・トラッキング

にある。信号処理での重要な処理は予測値によるドップラ補正であり、上記の受信系の周波数安定度が悪い場合には、その処理自体が用を成さない。

それでは、「要求される周波数安定度は果たしていくらか？」という疑問に対して、信号検出で用いた処理計算でシミュレーションしてみた。

## シミュレーションとその仮定条件

CT1DMK の受信においては、受信機の周波数を固定したままとし、ドップラ補正を信号処理で行なっている。一方、受信機の周波数をドップラ予測値で制御することでドップラ補正を行なえば、録音信号にはドップラ・シフトが含まれず、信号処理として単純に FFT を掛けて積分すれば良い。いずれにおいても受信機の周波数が不安定であれば、例えば周波数がドリフト

すれば、予測値によるドップラ補正の結果に誤差を含む。

シミュレーションでは、受信機の周波数ドリフトをドップラの予測値へ含ませることで、その影響を評価する。ドップラの予測値は  $-0.7923$  Hz/sec であり、受信録音時間の 900 秒でのドップラ・シフト量は  $-713.11$  Hz となる。受信機のローカル・オシレータの安定度を  $1E-9/1000$  sec と仮定すると、受信周波数である 8.4 GHz では  $8.4$  Hz/1000 sec の周波数ドリフトである。毎秒のドリフト率に換算すると  $8.4E-3$  Hz/sec であり、これをドップラ予測値に含ませて  $-0.8007$  Hz/sec でドップラ補正の計算を行なう。

本来は 900 秒間で  $-713.11$  Hz のドップラ・シフト量が、受信機の周波数変動のため  $-720.63$  Hz になると見なして信号処理を行なう。

ローカル・オシレータの安定度を  $1E-9/1000$  sec と仮定するが、これは一般的なクリスタル・オシレータの安定度であろう。8.4 GHz 帯において 1000 秒間で 8.4 Hz の周波数ドリフトは、特別な対策を施していない場合に実際にあり得ると考える。

## シミュレーション結果

信号処理プログラムの変更は必要なく、本来のドップラ変化率である  $-0.7923$  Hz/sec を  $-0.8007$  Hz/sec へ置換するだけで処理は完了する。受信機パスバンドの補正やビデオ・フィルタに変更はない。

受信機の周波数ドリフトをシミュレーションした結果を 図-1 に示す。比較のために、本来の結果、すなわち周波数ドリフトがない場合を 図-2 に示す。

図-1 においても 図-2 と同様に 5329 Hz にピーク波形が見て取れるが、他のピークと比較して大差ない。図-2 から結果を知ったうえでの先入観なしには、それを目的信号というには些か問題がある。

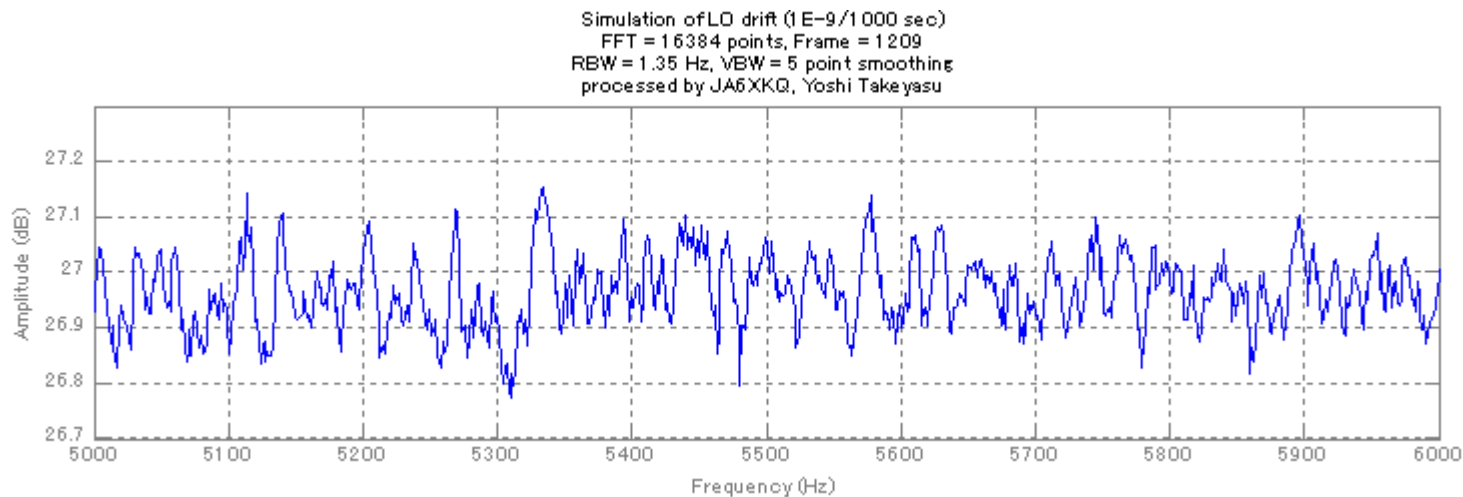


図-1 : 周波数ドリフトのシミュレーション結果

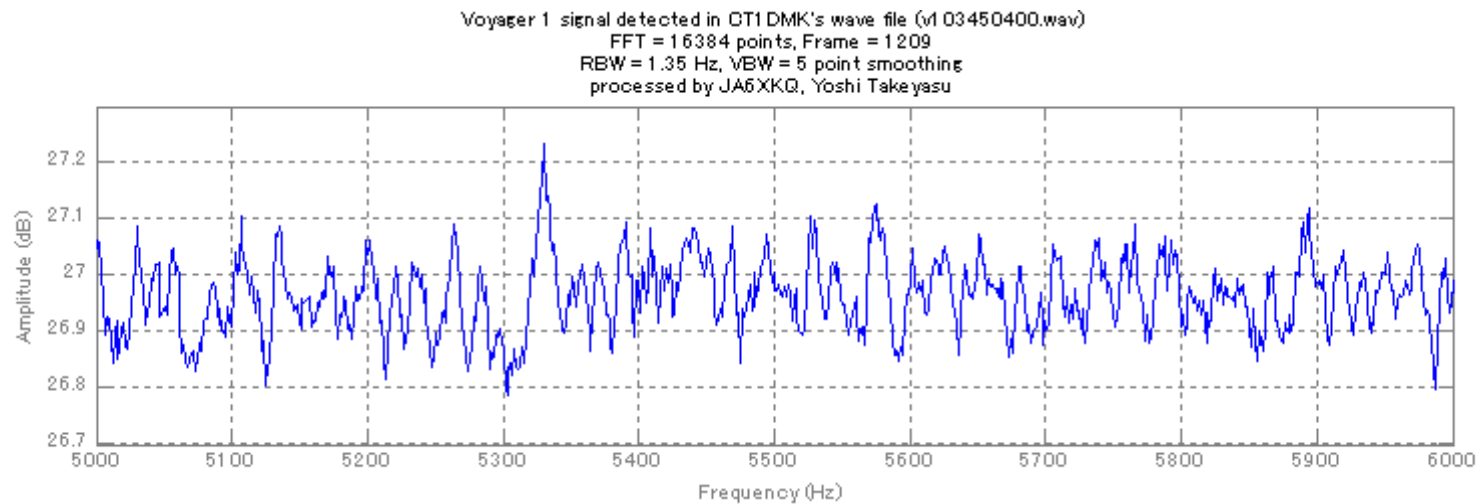


図-2 : CT1DMK による受信録音から検出した Voyager 1 信号 (5329 Hz のピーク波形) - 周波数ドリフト無し

## まとめ

シミュレーションの結果、受信機ローカル・オシレータの安定度として  $1E-9/1000$  sec では不十分であることが判った。それでは、どれ程の安定度が必要であるのか？ FFT の分解能が 1.35 Hz であり、処理期間の 900 秒で分解能以下の周波数ドリフトであれば処理結果への影響は無視できるだろう。8.4 GHz 帯での 1000 秒間の安定度に換算すると、 $1.78E-10/1000$  sec となる。安定度について何も対策していない一般的なクリスタル・オシレータよりも一桁高い安定度が必要と考えられる。

G3RUH を含む AMSAT-DL チームは Bochum で Voyager 1 の信号を、CT1DMK による受信以前の 2006 年 3 月に受信している。この時の様子が 2006 年 8 月の AMSAT-UK Colloquim にて、同じく AMSAT-DL チームの DH2VA/HB9DUN Achim Vollhardt により紹介されている。[2] によると、必要とする周波数安定度として  $1E-10/1000$  sec を掲げている。実際に使用された受信機のローカル・オシレータは、ルビジウム発振器を基準としている。CT1DMK の受信機も  $1E-10/1000$  sec 程度の安定度を持つと推定される。

本稿ではドップラ・シフトの予測値を基準として、受信機に要求される周波数安定度を検討した。信号処理においてはドップラ補正が要であり、本稿では基準としたドップラ・シフトの予測値自体の精度が処理誤差となることは G3RUH の解説にある。[3] DSN 探査機からの信号を処理するには、受信機の周波数安定度とドップラ・シフト予測値の精度が重要であると理解できた。

(2009年8月14日 第一版)

(2009年8月15日 第二版)

//

☆

## 参考資料

- [1] CT1DMK による受信録音からの Voyager 1 信号の検出  
武安義幸 / JA6XKQ  
[http://www.terra.dti.ne.jp/~takeyasu/Voyager1\\_1.pdf](http://www.terra.dti.ne.jp/~takeyasu/Voyager1_1.pdf)
- [2] Achim Vollhardt / DH2VA / HB9DUN  
[http://www.amsat-dl.org/pic/gallery2/d/6706-3/surrey2006\\_folien20-38.pdf](http://www.amsat-dl.org/pic/gallery2/d/6706-3/surrey2006_folien20-38.pdf)
- [3] Independent data analysis of Voyager 1 signal in CT1DMK's wave file  
James Miller / G3RUH  
[http://www.terra.dti.ne.jp/~takeyasu/Voyager1\\_G3RUH.pdf](http://www.terra.dti.ne.jp/~takeyasu/Voyager1_G3RUH.pdf)

## 追記 — ドップラ、分解能、そして周波数安定度

「まとめ」に書いた「FFT の分解能が 1.35 Hz であり、処理期間の 900 秒で分解能以下の周波数ドリフトであれば処理結果への影響は無視できるだろう」というくだりが、「ニワトリと卵」に思われるかもしれない。「周波数ドリフトの影響を小さくするために FFT の分解能を低くすれば良いのではないか？」という疑問が出てくる。

C/N を上げるには FFT の分解能を高くて (RBW を狭くして) 帯域内ノイズ電力を下げ、そして時間積分するすることが本信号処理のコンセプトである。したがって、FFT の分解能はできるだけ高くしたい。「できるだけ」とは、幾らか？ 処理対象の信号自体にドップラ・シフト ( $-0.7923$  Hz/sec) があるので、1 回の FFT 処理内ではドップラ・シフトが分解能内に収まるようにする必要がある。バケツからこぼれ落ちた水を後から拾い上げて集め直すのは効率が悪いから、、、

RBW = 1.35 Hz なる数値は、サンプリング周波数 22050 Hz の信号に対して 16384 (=  $2^{14}$ ) 点の FFT を掛けたことに由来する。そして、FFT の

フレームは 0.743 sec である。この間のドップラ・シフト量は 0.589 Hz で、FFT の分解能内に収まっている。

C/N を上げる目的から FFT の点数を 2 倍の 32768 点、すなわち RBW = 0.673 Hz とすると FFT の 1 フレームは 1.486 sec で、この間のドップラ・シフト量は 1.177 Hz となる。結果として、ドップラ・シフト量が分解能を上まわる。

したがって、上記の数値例から、今回の信号処理では RBW = 1.35 Hz が分解能の限界と判断される。はじめに処理対象の信号のドップラ・シフト変化率があり、それを処理するに最適な FFT 分解能が決定される。これらの関係からハードウェアに要求される周波数安定度が規定されるので、「ニワトリと卵」で悩むことはない。

(2009年8月15日 追記)