

## Detecting Voyager 1 signal in CT1DMK's wave file CT1DMK による受信録音からの Voyager 1 信号の検出 武安義幸 / JA6XKQ

2006 年 4 月に CT1DMK Luis Cupido が、わずか 6m のディッシュで Voyager 1 の信号を検出したとの報 [1] に接した時には、たいへんな驚きと感動を覚えた。彼のホームページには、その受信録音が掲載されており、「自分でも検出を試してみても」とある。

その受信録音から G3RUH James Miller が独自に信号を検出し、その手法を詳細に解説している。[2] 詳説されているので、それを読めば「なるほど」と理解した気分になってしまい、自分で実際に試すことを怠っていた。

試すことが永らく待ち行列にあったが、G3RUH の解説に従って試してみると、意外と簡単に同様な結果(図-1)を得ることができた。ここでは自分が試した信号処理の過程を示すにとどめる。信号処理の原理については G3RUH の解説を、翻訳の許諾を得た後に付録に掲載する予定である。

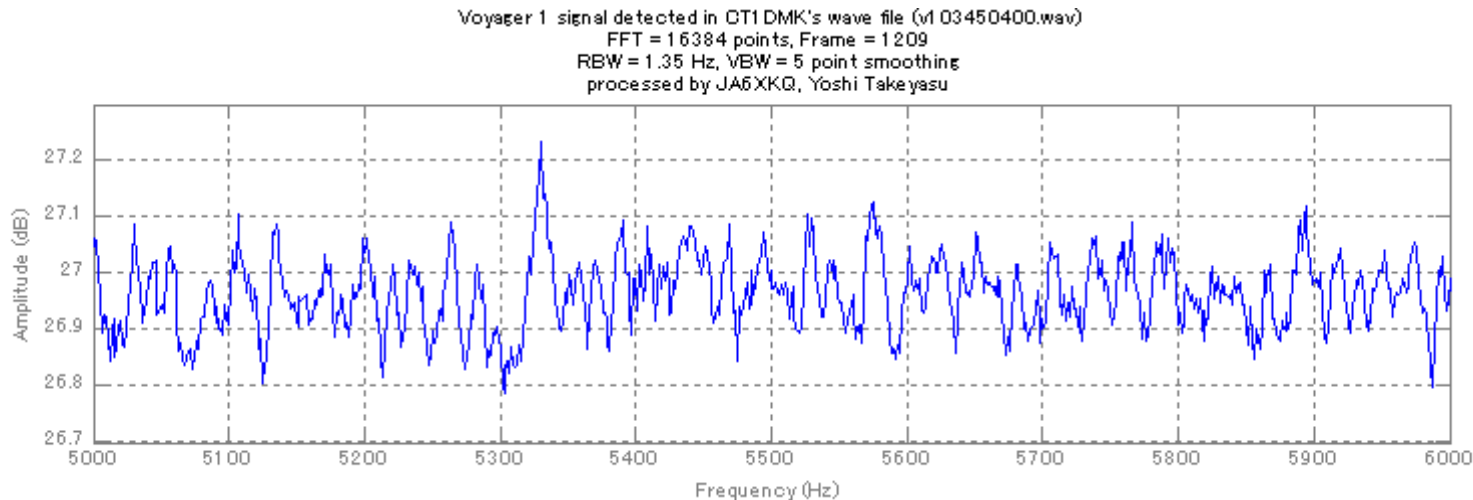


図-1 : CT1DMK による受信録音から検出した Voyager 1 信号 (5329 Hz のピーク波形)

## 信号処理の流れ

信号処理の全体の流れを下記に示す。

- 1 受信機パスバンドの振幅周波数偏差の算出
- 2 FFT
- 3 FFT の結果に対して 1 で算出した特性でイコライズ
- 4 ドップラ・シフト分だけ FFT 結果の周波数をずらす
- 5 一つ前の FFT フレームの結果と足し合わせる
- 6 2 ~ 5 を繰返し、最後にフレーム数で平均する
- 7 隣接周波数で平滑(スムージング)する(スペクトラム・アナライザのビデオ・フィルタに相当)

信号処理の主眼は、信号を時間積分(足し合わせる)ことで微弱信号の S/N を改善することにある。

## 受信機パスバンドの振幅周波数偏差とイコライジング

まず最初に受信機パスバンドの振幅周波数偏差を求める。これは信号処理の全体像が判明した後の表現であって、当初から想定された処理ではない。試行してみると受信機パスバンドの振幅周波数偏差の補正が必要であろうと判明したのである。

受信録音ファイル(v103450400.wav)に対して単純に FFT を施したものが 図-2 である。Wave ファイルのサンプリング周波数は 22050 Hz であり、FFT は 16384 点なので、周波数分解能は 1.35 Hz となる。また、Wave ファイルの長さは 900 秒なので、1 フレームが 16384 点の FFT を 1209 フレーム施すことになる。その 1209 フレームの FFT 結果を単純に足し合わせて平均をとったものが 図-2 である。

もし、受信信号にドップラ・シフトが無いならば 1209 回の足し算(積分)の効果で、この 図-2 に信号のスペクトラムが浮き出てくるはずだが、-713.11 Hz のドップラ・シフトで目的信号は拡散している。図-1 との比較のために、図-3 に周波数軸を拡大して示す。最終結果から判断して 5300 Hz から 4600 Hz にわたって信号が拡散していると期待されるので、拡大範囲をそこに合わせた。

図-2 の結果から、受信機パスバンドは約 2 dB の振幅周波数偏差を持っていることが判る。ドップラ・シフトの 713.11 Hz においては約 0.25 dB の振

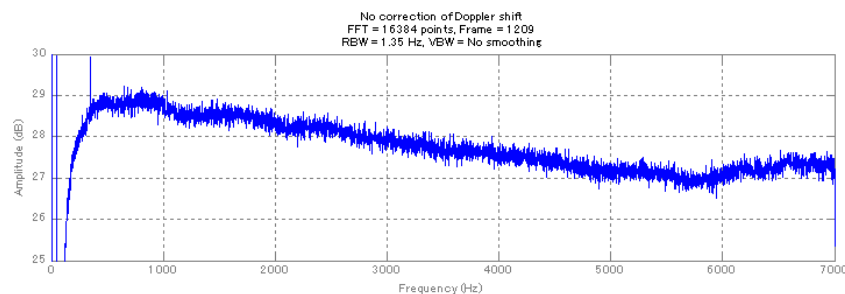


図-2 : 受信機パスバンドの振幅周波数偏差 — スムージング無し

幅周波数偏差であり、積分利得が損なわれる。

振幅周波数偏差をイコライズするには 図-2 のままではノイズの影響が大きいため、ノイズを除去した特性でイコライズする。図-2 に対して近接周波数 128 点でスムージングを掛けたものが 図-4 である。

図-4 の逆特性を FFT 結果に掛け合わせることでイコライジングを行なう。

## ドップラ・シフトの補正

目的信号にはドップラ・シフトがあるので、それを補正して足し合わせる必要がある。この処理の様子を 図-5 に模式的に示す。

図-5 の上部の波形は受信録音された Wave ファイルの波形で、横軸は時間である。この波形に対して 16384 点のサンプリングをフレームとする FFT を施す。Wave ファイルのサンプリング周波数が 22050 Hz であるので、1 フレームの時間は 743 ミリ秒となる。

図-5 の下部左の波形は周波数領域に変換された信号を模式的に示す。目的信号は -0.7923 Hz/sec のドップラ・シフト・レートを持っていると予測されるので、FFT のフレーム毎に周波数が下がっていく様子を示している。

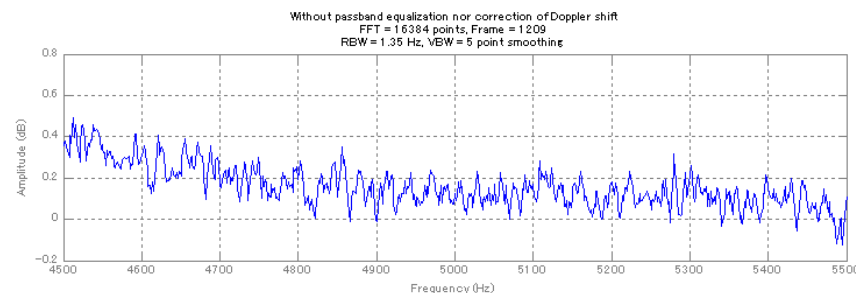


図-3 : 受信機パスバンドの振幅周波数偏差 — 周波数軸拡大

図-5 の下部右の波形は、フレーム毎のドップラ・シフトを補正する様子を示す。ドップラ・シフトのために下がった周波数を上にシフトさせる処理を FFT 後の周波数領域で行なっている。周波数をシフトさせる処理は、FFT の結果を一行の配列とみなし、配列要素をシフトすることで行なう。すなわち、配列要素の先頭にシフト分の要素を追加し、また、配列要素の最後尾の要素をシフト分だけ削除する。

ここで重要なポイントは、ドップラ・シフトの周波数、FFT の分解能、そして FFT フレーム数の関係である。換言すれば、ドップラ・シフトが FFT の分解能 (1.35 Hz) と等しくなるサンプル数は幾らか? となる。 $-0.7923 \text{ Hz/sec}$  のドップラ・シフト・レートなので、1.698 秒 (サンプル数では 37454 点) 毎に FFT 結果の配列要素を 1 要素だけシフトさせれば良い。

ドップラ・シフト補正に関するサンプル数 37454 点と FFT フレームのサンプル数 16384 が整数倍の関係にないので、補正には丸め誤差を含む。

ドップラ・シフト補正を FFT 後の周波数領域で行なっているが、G3RUH は FFT 前の時間領域で Wave ファイルのデータに対して補正を掛けている点が本稿と異なる。

図-6 にドップラ・シフト補正後に検出された信号を示す。

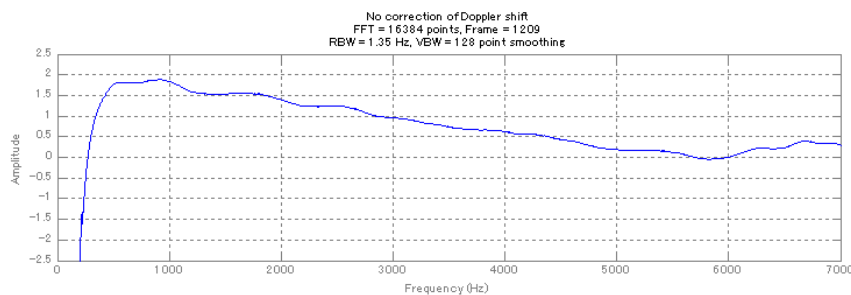


図-4 : 受信機パスバンドの周波数特性 - スムージング有り

## ビデオ・フィルタ

図-6 の状態では信号らしきものが判るが、スパイク状のノイズで識別が難しい。目的信号は FFT 分解能よりも広がった帯域を持っているようなので、スパイク状のノイズを除去するには隣接周波数での平滑 (スムージング) が有効である。これは、スペクトラム・アナライザでのビデオ・フィルタに相当する。

図-6 に対して近隣 5 点でのスムージングを施したものが 図-1 である。スパイク状のノイズが軽減され、目的信号と思われるスペクトラムが 5329 Hz に識別できる。

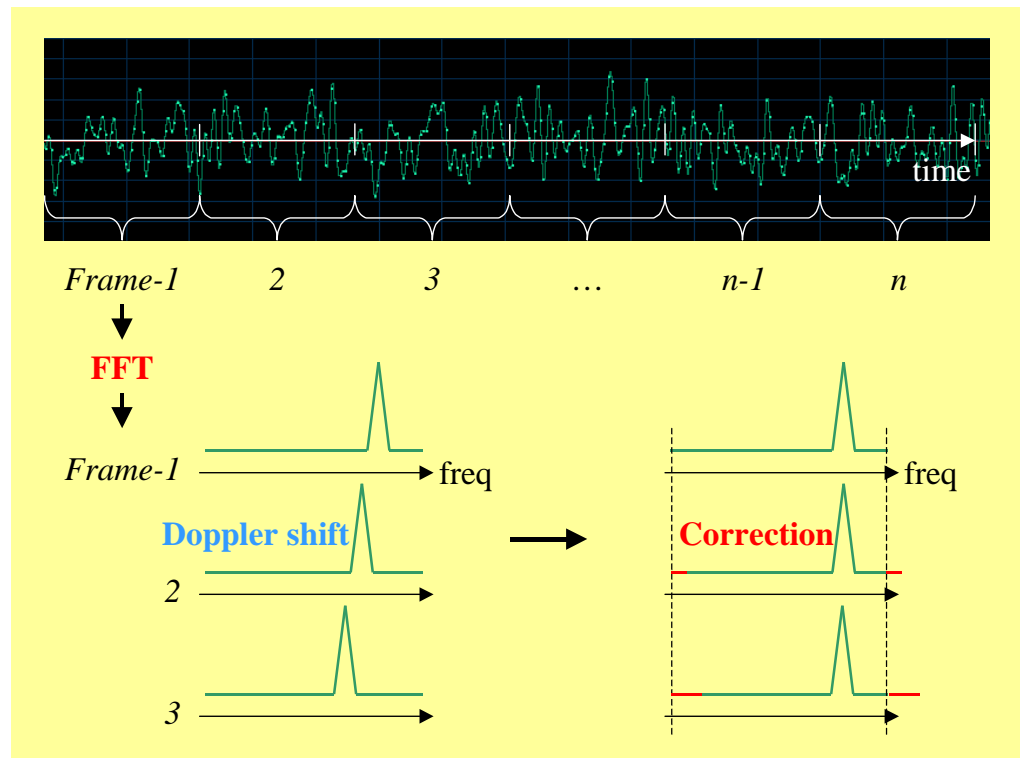


図-5 : FFT とドップラ・シフトの補正

## まとめ

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。

ここには二つの重要なポイントが含まれていると思う。信号処理にはフロントエンドとバックエンドがある。ポイントの一つは、フロントエンドとしての CT1DMK の受信設備の優秀さである。受信系の G/T が優れていることは勿論であるが、受信系総合での利得安定度、周波数安定度、アンテナ・トラッキングのいずれも、長時間での安定度が優れていないことにはバックエンドとしてのポスト・プロセッシングが成立しない。そして、バックエンドとして G3RUH が解説する確立された信号処理手法とそのパラメータのお陰で試行錯誤無く、同一結果に到達した。

「そこに信号がある」という確信ゆえに私にも検出できたのだと思う。先達の成果をトレースしただけであるが、驚きと感動を追体験することができた。

(2009年7月26日 第二版)

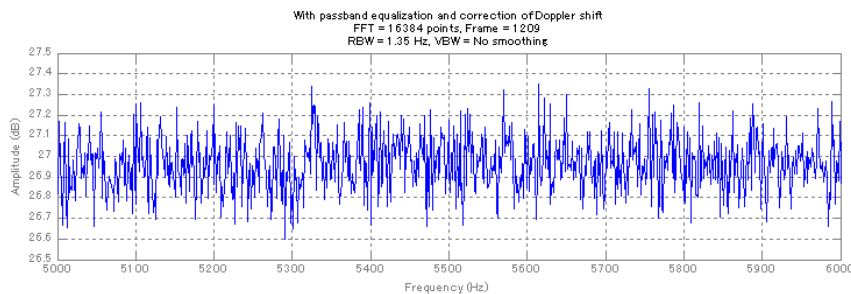


図-6 : ドップラ・シフト補正で検出された信号

## 参考資料

- [1] Receiving the deep space spacecrafts  
Luis Cupido / CT1DMK  
<http://w3ref.cfn.ist.utl.pt/cupido/dsn.html>
- [2] Independent data analysis by James Miller G3RUH  
James Miller / G3RUH  
[http://w3ref.cfn.ist.utl.pt/cupido/v1\\_ruh.txt](http://w3ref.cfn.ist.utl.pt/cupido/v1_ruh.txt)