

**Independent data analysis of Voyager 1 signal  
in CT1DMK's wave file  
by James Miller / G3RUH  
© 2006 James Miller / G3RUH**

**translation by Yoshiyuki Takeyasu / JA6XKQ  
翻訳 武安義幸 / JA6XKQ**

CT1DMK Luis Cupido の Voyager 1 の信号検出 [1] に関連して、G3RUH James Miller が CT1DMK とは独立した手法で信号解析を行なっている。その手法と結果が CT1DMK のホームページに掲載されており [2]、自分で試してみる際のお手本とした。[3]

James Miller 氏より翻訳の許諾を得たので、微弱信号検出の信号処理の基本として情報を共有したい。

Permission granted by James Miller / G3RUH .

## **v103450400.wav の信号処理**

Luis さん、

ホームページにある .wav ファイルをゴリゴリと計算するという、何か埋蔵物探しで岩石を挽き砕くことに似た、楽しいひと時をすごしました。以下は、判明したことについての考察です。

Luis さんが Voyager -1 の信号を検出されていることに疑いの余地はありません。この .wav ファイルだけでは検出が確定的だとは思いませんが、他の録音からも同様な信号を検出されていることは、信号検出が間違いのないものであることを裏付けています。

## **解析ツール**

私は独自の信号処理プログラムを書きました。したがって、ここに報告する内容は、Luis さんとは独立した処理であることを意味します。Luis さんの検出結果の再現に努めた結果、大筋での一致を得ました。

## **ドップラ**

録音期間中のドップラ・シフトの予測値を、独自の計算で確かめてみました。Bochum の電波望遠鏡を制御したソフトウェアで用いているライブラリ・ルーチンを使っています。[訳注 4] その結果、JPL の Horizons [訳注 5] と同じ値が得られました。これは、Horizons も私のライブラリ・ルーチンも同じアルゴリズムに基づいているためです。確認においては特に、1 分間隔でのドップラ・シフトを計算して、それらを線形近似することで、ドップラの変化率について受信録音時間の 15 分間で著しい非線形性があるか否かを検証しました。変化率には非線形性はなく直線的なもので、 $-0.7923 \text{ Hz/s}$  なる周波数変化率と計算できました。

## **FFT など**

次に、録音信号を色々と分解能を変えながら FFT に掛けてみました。分解能の他にドップラに対する補正の有無も試しています。

試した結果、基本的な信号処理は 16384 点の FFT として、22050 サンプル/秒の信号に対して 1.35 Hz の分解能となり、一回の FFT あたりの信号長は 0.74 秒です。したがって、900 秒の録音信号について約 1200 回の FFT を掛け、それらを一つに合成して平均することで処理結果のスペクトラムを得ます。これらのパラメータで処理すると、図に示されているノイズ・フロア(ジッタ)は約 0.125 dB です。

## 受信機の通過帯域特性

受信機の通過帯域特性を 図-1 に示します。これはドップラの補正を掛けずに、2048 点の FFT で処理したものです。分解能は 10.8 Hz です。着目すべき特徴は通過帯域にわたって 2 dB の傾斜があることです。また、7000 Hz に急峻なカットオフ (7050 Hz で -20 dB) がありますが、これはサウンド・カードのアンチ・エイリアス・フィルタだと思っています。通過帯域内に 0.2 dB くらいのリップルがあることも図から明らかです。

通過帯域特性の傾斜とリップルは我々が探している信号と同等の振幅なので、信号処理において注意が必要です。通過帯域内の周波数特性は、図-1 に示すスペクトラムを近隣 100 点の周波数で平均化することで得た周波数特性を差し引くことで概略取り除くことが可能です。この処理はノイズフロアを約 10 % 増加させますが、スペクトラム表示を明瞭にします。

通過帯域の 1 kHz 以下と 6 kHz 以上は無視できることも明らかです。

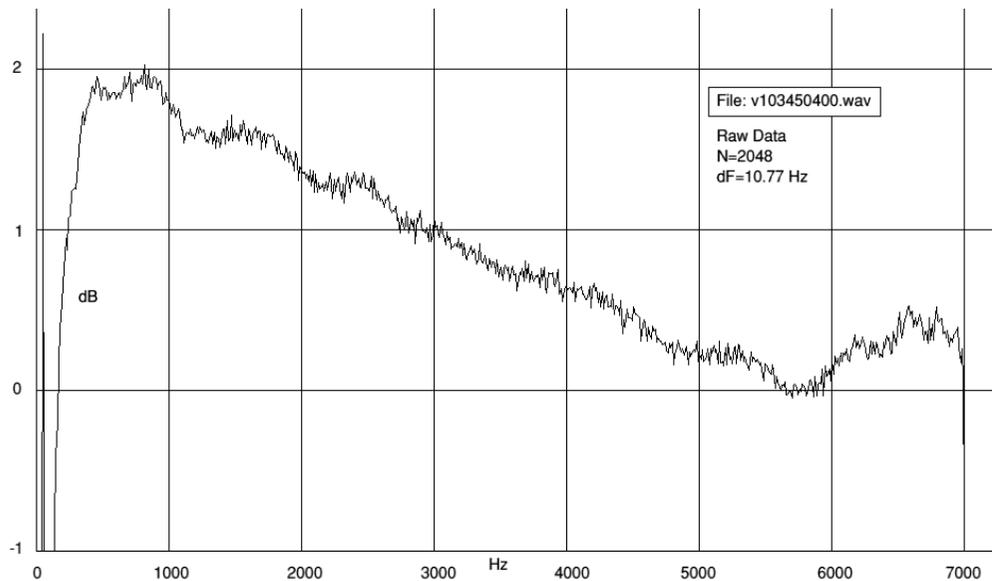


図-1 : 受信機の通過帯域特性

(C) 2009, Yoshiyuki Takeyasu / JA6XKQ

## ドップラの補正

次に、前述のドップラ・シフト予測値に基づいて FFT 結果を補正する処理についてみてみましょう。ドップラ・シフト無しの場合には、FFT 処理において実部には  $\text{Real}(t) = V(t)$  を代入し、虚部にはゼロを代入するのが通常の処理です。FFT への入力信号を「シフト」させるには、実部には  $\text{Real}(t) = V(t) * \cos(p(t))$  を代入し、虚部には  $\text{Imag}(t) = -V(t) * \sin(p(t))$  と代入します。ここで  $p(t) = w * t + 0.5 * wd * t * t$  で、 $w$  は、処理対象である信号のスタート時点での角周波数であり、 $wd$  は角周波数の変化率です。

この処理を 図-2 に示します。図中のノイズ成分は 0.125 dB rms です。信号検出の判定には、何か基準となる線引きが必要です。例えば、ノイズよりも 4.5 倍 (0.6 dB) 大きいとか、、、これは縦軸目盛の半分よりも大きなものであり、この判定基準では、図-2 には有意な信号は存在しないことになります。

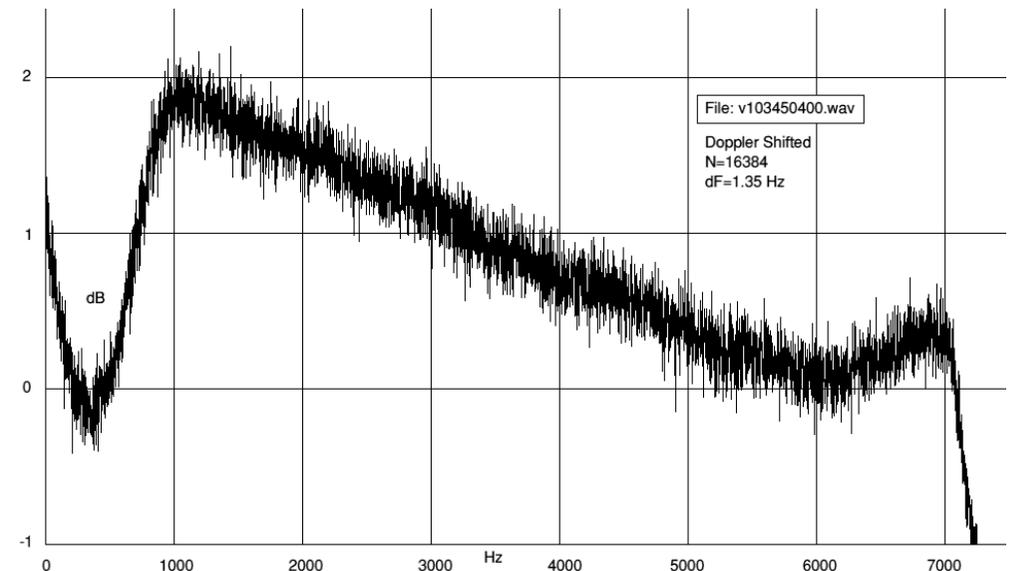


図-2 : ドップラの補正

(C) 2009, Yoshiyuki Takeyasu / JA6XKQ

## 信号の拡散？

一方で、信号検出の判定基準では、目的信号はきれいなキャリアで一本の線スペクトラムであり、分解能である 1.35 Hz の帯域内に納まっているものと仮定しています。この仮定は正しくないかもしれません。信号処理に含んでいない、モデル化されていない周波数シフトの可能性は：

- \* 探査機の周波数ドリフト
- \* 宇宙空間のシンチレーション
- \* 受信機ローカル周波数の基準源である GPSDO の安定度が  $1E-10$  を越えている
- \* ドップラ・シフトの変化が直線的でない
- \* 受信機の周波数ドリフト

これらの周波数シフトが 1.35 Hz 以上であると仮定すると、近隣周波数 3 点での平均化処理を行うべきです。図-3 にこの平均化処理の結果を示します。処理の結果、図-3の 1350 Hz と 5325 Hz に何か信号が見えてきます。

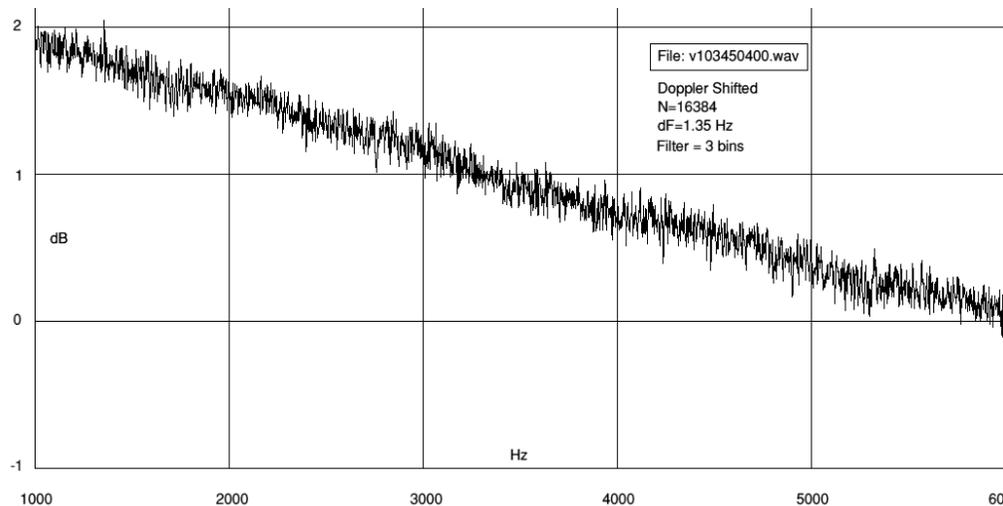


図-3 : 3点での平均化処理

前述の基本となる 図-2 のスペクトラムの 5325 Hz 近辺を拡大してみると、近隣 5 点の周波数で同じような振幅を示しています。これは、信号がおおよそ  $5 \times 1.35 = 7$  Hz にわたって広がっていることを示唆します。

## 信号拡散の取扱い

以上の考察から、近隣 5 点の周波数で平均化(相関処理)を施した結果を図-4 に示します。図-4 は 5000-6000 Hz を引き伸ばし、さらに縦軸も拡大しています。相関のピークはおおよそ 0.26 dB であり、一方のノイズ・フロアは  $0.125/\sqrt{5} = 0.056$  dB です。これらの数値から検出基準を算出すると  $0.26/0.056 = 4.7:1$  であり、このピークが目的信号の最有力候補となります。

$(S+N)/N = 0.26$  dB から  $S/N = 0.0617$  (真数)となります。FFT の分解能は 1.35 Hz、したがって信号強度は  $P_c/N_o = 0.0617 \times 1.35 \times 5 = 0.415$  Hz、すなわち -3.8 dB [Hz] と算出されます。

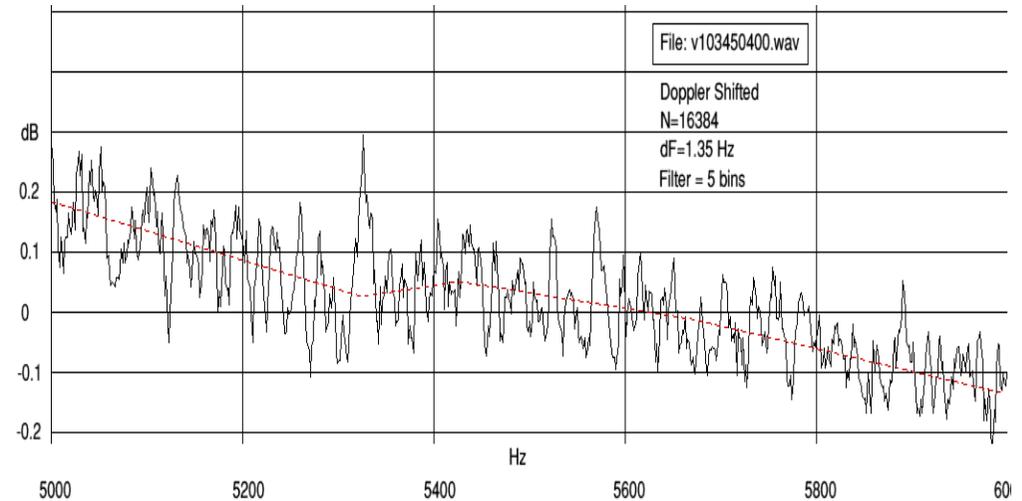


図-4 : 5点での平均化処理

受信機の通過帯域特性は、前述のように取り除くことが可能です。その結果を図-5 に示します。図-4 と同様に計算すると、ピーク値 0.25 dB から  $P_c/No = -4.0$  dB [Hz] なる結果が得られます。検出値の不確かさは、1.4 dB rms と計算されます。

## 結論

$P_c/No = -4.0$  dB [Hz] なる検出結果は、期待値 である  $-5.9$  dB [Hz] よりも少し高い値です。しかし一方で、期待値には信号処理と同様に不確かさを含んでいるので、ここに述べた結果は概略正しいものと思います。

James Miller G3RUH

初版: 2006 Apr 20 [Thu] 1459 utc

## 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)
- [3] 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)
- [訳注 4] Control Software for the Bochum Radio Telescope  
<http://www.amsat.org/amsat/articles/g3ruh/126.html>
- [訳注 5] HORIZONS System  
<http://ssd.jpl.nasa.gov/?horizons>

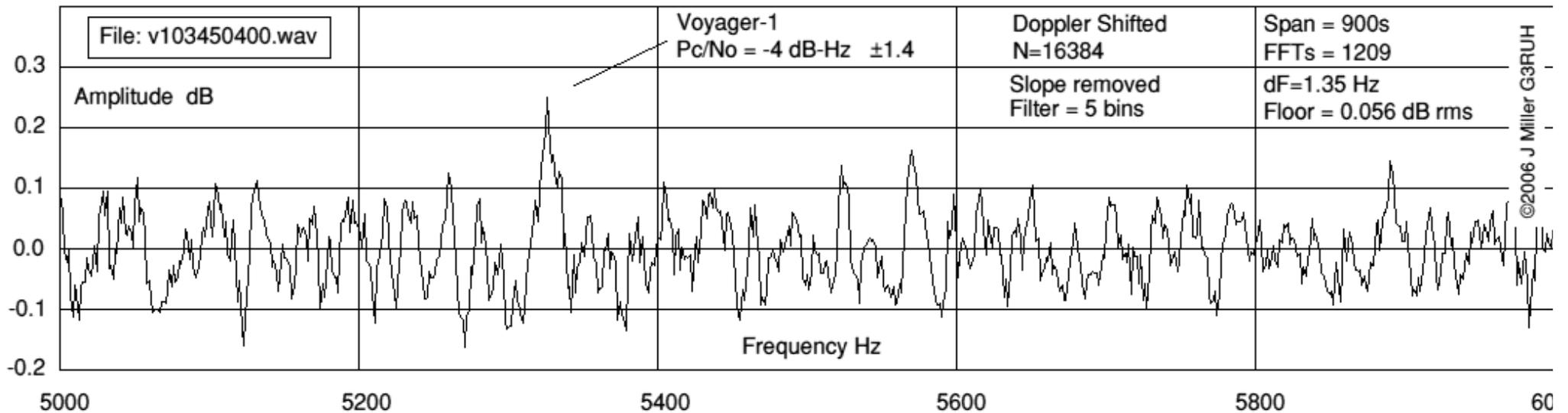


図-5 : 検出結果