

PLL を用いたホイッスラ分散値の自動計測

太田 健次*, 江口 博之*

The Automatic Measurement of the Dispersion of Whistler Using the PLL

Kenji Ota* and Hiroyuki Eguchi*

(Received September 18, 1976)

We can not get the sufficient data of whistlers by only the routine observation during the short time, because of the low latitude. To evaluate the dispersion of whistler, the sonagraph is used in general, but it is difficult to analyse the data continuously without delay. Observing the time difference ($t_2 - t_1$) as a function of whistler (f_1, f_2), D is given by

$$D = (t_2 - t_1) / (f_2^{-1/2} - f_1^{-1/2}) = k(t_2 - t_1)$$

Consequently it is possible to obtain the dispersion with the Phase Locked Loop discriminator and comparator circuits to measure ($t_2 - t_1$). The results of measurement are satisfactory and the time to analyse whistlers is remarkably reduced.

1 まえがき

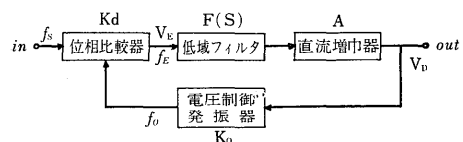
ホイッスラは周波数が時間的に変化する gliding tone で $t = Df^{-1/2}$ の関係があり一種の周波数変調信号と見なせるので、筆者らは低周波ディスクリミネータを用いてホイッスラ分散値の簡易計測を行ってきた。^{1)~2)}

通常周波数弁別回路を動作させる場合、入力信号電圧が一定レベル以上のものはリミッタ回路で制御できるがそのレベルに達しない強度変化に対しては同一のディスクリカーブを描かないので出力電圧で入力周波数を求めることはできない。筆者らは周波数弁別回路の前段にしゃ断特性のよい BPF (5KHz~3KHz) を置きホイッスラが高い周波数から低い周波数へと移動するにしたがって1サイクルのディスクリカーブを描かせ、その1サイクルの周波数を測定し分散値を求める方式を開発したが1サイクルの波形のみで、ソナグラフ装置の fit on 形式で求まる分散値に比してある程度正確に測定し、その

データを実時間処理を行なうのは困難である。また数サイクルの連続波形を得るために数個の BPF を組み合わせても自己相関計など高度な測定方式を必要とする。^{3)~4)} Phase Locked Loop (以下 PLL と記す) IC の電圧周波数変換特性は直線性が非常によく入力信号電圧の強度変化に対してロックレンジが変化するのみで同一の直線性を保っており出力電圧で入力信号の周波数が正確に求められるのでこれを利用したホイッスラ検出および分散値の自動計測について報告する。

2 原理

PLL の構成図を第1図に、その電圧一周波数特性を

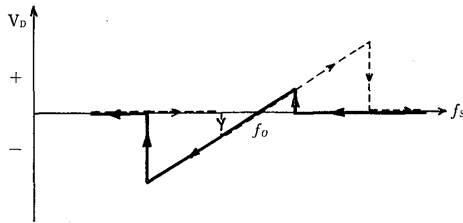


第1図 PLLの構成図

* 電子工学科 (Department of Electronic Engineering)

第2図に示す。^{5)~6)}

第1図において入力信号 f_s が加えられると、位相比較器により f_s と VCO の free running 周波数 f_o 間の周波数と位相が比較され、その差に関係する誤差電圧 V_e が発生し、低域フィルタで低周波分だけが取り出され直流増巾器を通り VCO の制御電圧 V_D となる。この V_D で f_o と f_s の位相差が小さくなるように VCO を制御し、 f_s と f_o が十分近ければ PLL はロックする。しかし f_s と f_o の差が大きいと位相比較器から出た誤差信号周波数 f_e が高くなり低域フィルタで減衰されるので PLL はロックレンジからはずれ、第2図の電圧—周波数特性が得られる。



第2図 PLL の電圧—周波数特性

ロックレンジの PLL の動作は入力信号電圧を v_s 、VCO 出力電圧を v_o とすれば(1)、(2)で与えられる。

$$v_s = V_s \sin[wt + \theta_i(t)] \quad (1)$$

$$v_o = V_o \cos[wt + \theta_o(t)] \quad (2)$$

位相比較器の出力は v_s と v_o の積が得られその差成分 v_e は

$$v_e = K_a \sin[\theta_i(t) - \theta_o(t)] \approx K_a[\theta_i(t) - \theta_o(t)] \quad (3)$$

ただし K_a は位相比較器の変換利得
また誤差電圧 v_a は(4)式で与えられる。

$$v_a = K_d F(S) A[\theta_i(t) - \theta_o(t)] \quad (4)$$

ただし $F(S)$ はフィルタの伝達関数、 A は DC Amp の利得

v_a による VCO の周波数変化分 Δw_o は

$$\Delta w_o = 2\pi \Delta f_o = \frac{d\theta_o(t)}{dt} = K_o v_a \quad (5)$$

ただし K_o は VCO の変換利得

(1)式~(5)式より

$$\frac{\theta_o(S)}{\theta_i(S)} = \frac{K_o K_d A F(S)}{S + K_o K_d A F(S)} \quad (6)$$

$\theta_e(S) = \theta_i(S) - \theta_o(S)$ とすれば

$$\frac{\theta_e(S)}{\theta_i(S)} = \frac{S}{S + K_o K_d A F(S)} \quad (7)$$

ここで入力信号の位相が $\Delta\theta_i$ だけ変化したとき(7)式より

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \theta_e(t) = \lim_{S \rightarrow 0} \frac{S^2 \theta_i(S)}{S + K_o K_d A F(S)} = 0$$

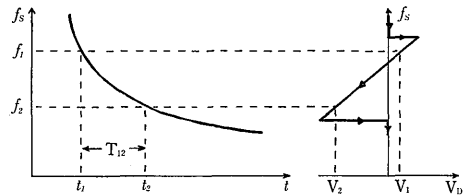
$$= \lim_{S \rightarrow 0} \frac{S \Delta\theta_i}{S + K_o K_d A F(S)} = 0 \quad (8)$$

となり入力信号と VCO の出力周波数との位相誤差は生じない。この例の場合ちょうど 90° の位相差で系は安定している。また入力信号の周波数が Δw 変化した場合は同様にして

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \theta_e(t) = \lim_{S \rightarrow 0} \frac{\Delta w}{S + K_o K_d A F(S)} = \frac{\Delta w}{K_o K_d A F(S)} \quad (9)$$

となり入力信号と VCO の出力周波数との位相誤差は周波数偏移の大きさに比例する。

この電圧—周波数特性は第2図のように入力信号周波数を高くして行ったときと入力信号周波数を低くして行ったときでヒステリシス特性を示すがホイッスラは常に周波数の高い方から低い方へ移るので、実線矢印方向へ移動する。



第3図 分散値の測定原理

この特性を用い、第3図のように特定の周波数 f_1 、 f_2 を選びそれぞれの時間を t_1 、 t_2 とすると分散値 D は

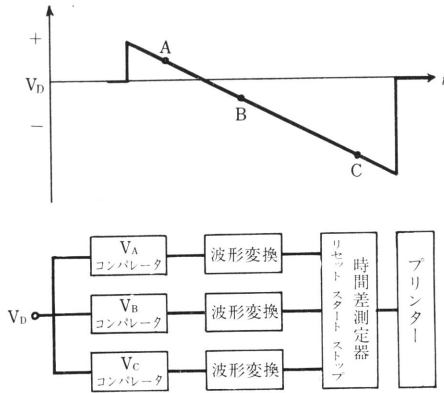
$$D = \frac{t_2 - t_1}{\frac{1}{\sqrt{f_2}} - \frac{1}{\sqrt{f_1}}} = k(t_2 - t_1) = kT_{12} \quad (10)$$

で与えられる。⁷⁾これにより t_1 より t_2 までの時間差 T_{12} を測定すれば分散値が求まる。PLL の電圧—周波数特性上では電圧 V_1 より V_2 に達するまでの時間差を測定するものである。この方式の利点はパルス性空電雑音に対しては PLL の低域フィルタを選択し過渡応答特性を遅くさせ、出力電圧を小さくおさえることができる。フィルタの帯域巾を狭くした場合、PLL の動作に与える影響は、(a)引込時間が長くなる。(b)キャプチャレンジが狭くなる。(c)キャプチャレンジ内で入力信号周波数が急に变化した場合の過渡応答が遅くなる。などであるが、測定可能な最小分散値を定めればそれ以上の分散値に対しては LPF を通過できるのでフィルタのシャ断周波数と測定できる最小分散値は密接な関係を持つ。

3 測定方式

第4図に測定基本回路の構成図を示す。

PLL の電圧—周波数特性線の上に点A、B、Cを定めそれぞれの出力電圧、周波数とその通過時間を(V_A , f_A , t_A)、



第4図 分散値の測定回路

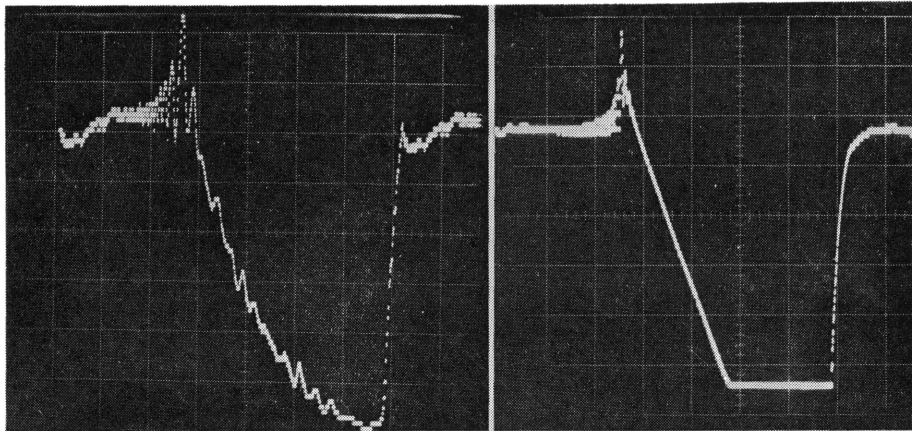
(V_B, f_B, t_B), (V_C, f_C, t_C) とする。PLLの出力電圧を V_A, V_B, V_C の基準電圧を持った3組のコンパレータ回路に導き、波形変換を行って時間差測定器の Reset, Start, Stop の各パルス信号を作り出す。

(10) 式よりホイッスラ分散値 D は

$$D = k(t_C - t_B) = kT_{BC} \quad (11)$$

で求まる。 k は f_B, f_C で求まる定数だからプリントされた T_{BC} に定数 k を乗算したものが求める分散値である。

ロックレンジ内でホイッスラ強度が十分ならば点A, B, C をどこに定めても分散値は求まるが実際は種々の問題を含んでいる。写真1に実際の出力波形を示す。



広帯域LPFで全出力波形

狭帯域LPFで一部を拡大した波形

写真1 PLL の出力波形

(a) リセットパルスを発生する点Aについて

VCO の free running 周波数 f_0 が一般空電雑音によって変動し PLL の出力電圧が常に 0 電圧を中心として + 電圧方向, - 電圧方向に変動しているがホイッスラ強度が弱い場合は + 電圧方向に十分引き込むことが困難なこともある。よって + 電圧方向に点Aを取るのはいま好ましくない。

(b) スタートパルスを発生する点Bについて

リセット機構さえ完備していればスタートパルスは一般空電雑音の場合でもパルスを発生してもよいので本来は点Aと点Bが近いほど誤動作が少ない。理想的には点Aと点Bを同一にすることである。ただし時間差を作るためAのパルスは低電圧から高電圧へと移動した場合に、Bのパルスは高電圧より低電圧へと移動した場合にそれぞれのパルスを発生させる。また(a)の場合も考慮して一般空電雑音による出力電圧より低電圧にB点を設定する。

(c) ストップパルスを発生する点Cについて

分散値の測定誤差を少なくするために点Cは点Bより離れる必要があるがホイッスラ強度が弱くなるとロックレンジが狭くなるのでホイッスラ検出の確率を高めるためには点Bに近づく必要がある。またストップパルスでプリンターの印字命令を出すので点Cに達した後、ただちに 0 電圧に帰してリセットパルスを発生した場合はプリンターが正常動作を行わないのでC点に達する直前にリセットオフ回路を動作させ、印字終了後にリセット回路を動作させる。印字命令をC点から取り出し出すのはホイッスラ検出と分散値測定を同時に行ないデータ処理を簡素化するためである。

この方式で分散値が求まらないのは $f_A \sim f_C$ 間にホイッスラ成分がない場合、成分があっても PLL をロックし点Cまで引き込むだけの強度がない場合、 $f_A \sim f_C$ 間の全帯域に同時に成分のある diffuse ホイッスラの場合、また1つのホイッスラがC点を通過し分散値を印字

しリセッtoff回路が動作している間に次のホイッスラが到来した場などであるが、日本のような低緯度では pure tone ホイッスラが多く、連続したホイッスラの場合も初めの分散値とまったく同一分散値を印字するので簡単に識別できる。

4 むすび

一般にホイッスラのデータは毎時20分～22分と50分～52分の合計4分間の空電現象をテープレコーダに録音し人間の耳でホイッスラを検出しソナグラフ装置で描かれた周波数一時間のカーブと、あらかじめ計算によって求めたカーブとを重ね合わせる、fit on 形式が用いられているが解析までに5分前後の時間を要し、連続観測を行う場合の難点となっている。また求めた分散値も ± 1.5 ～ ± 2.5 の誤差を含んでいる。しかし PLL を用いた分散値測定方式は約300msで解析でき、分散値の測定誤の差も ± 1 以内であり、測定装置も分散値を測定するのに最も安価な時間差測定器と記録に最低限必要と思われるプリンター以外に特殊な装置を要しないこと、またデ

ータ処理が簡単であり経費が安いので連続観測に適しているので今後さらに研究を進めたいと思っている。

5 謝 辞

この研究は本学の特別研究費の御援助によるもので、大学当局と金原 淳教授の御尽力に厚く感謝します。

またデータの検討をいただいた三上孝義技師補に感謝します。

なお本装置の試作にあたり50年度卒研究生の服部君、浜洲君、浜田君、肥田君の協力に謝意を表します。

文 献

- 1) 太田：中部工大紀要第8巻・A (1972)
- 2) 江口，太田：中部工大紀要第9巻・A (1973)
- 3) 江口，太田：中部工大紀要第10巻・A (1974)
- 4) 岡田，岩井：電通学誌B 1, 70 (1976)
- 5) Gardner: Phaselock Techniques Jhon Wiley & Sons (1966)
- 6) Signetics Linear PLL Applications Book (1972)
- 7) 江口，太田：大気電気研究第9号 (1973)