デジタルPLL方式VOR信号処理装置

二瓶 子朗*

Development of a VOR Signal Processor Using Digital Phase Lock Technique

Shiro NIHEI

Abstract

VOR(VHF omnidirectional radio range) is a short-range air navigation assistance facility of international standard providing directional information. The bearing of VOR is measured by the phase difference of two 30-Hz sine waves, reference and variable phase signals.

Recently, the bearing accuracy of VOR receiver has been made great improvement using a digital signal processing technique in place of an analog processing one. However, the bearing stability of a digital signal processor with zero cross detection method is not good when the receiving signal level is low or the distortion of detected signal is large.

In order to eliminate these defects, it is worked out a new VOR signal processor using a digital phase lock technique. It is replaced the reference and variable signals with two square waves which synchronize to these signals.

The experiment results of the new VOR signal processor are as follows. The bearing accuracy is less than 0.1° and the bearing fluctuation is less than 0.2° at the level of the minimum receiving sensitivity(-90 dBm).

1. ま え が き

VOR(VHF Omnidirectional radio Range: 超短波全方向式無線標識)は、航空機に磁北を基準とする方位情報を提供する国際標準方式の短距離航行援助施設であり、通常の場合、DME(距離測定装置)やタコン(軍用航行援助施設)と併設されて ρ (距離)- θ (角度)航法が行えるようになっている。

VOR 送信機からは、全方位にわたって位相が一定な30 Hz 正弦波の基準位相信号と受信方位によって位相が変化する30 Hz 正弦波の可変位相信号とを含んだ電波を放射する。これを航空機上の VOR 受信機で受信・検波して、基準位相信号と可変位相信号を分離・復調し、その位相差から受信方位を知ることができる。

我が国では、1958年に最初の VOR 局が設置されて以来、航空路構成用とターミナル空域への進入用に順次整備されて、現在では90局以上の VOR が設置されている。このうちの大部分は、反射波の影響を受けにくい特徴をもつドップラー効果を利用した VOR(ドップラー VOR)である^{(1),(2)}。

最近の VOR 送信装置の性能は、ドップラー VOR の採用と送信装置の固体化などによって、方位精度と動作の安定性が格段に向上している^{(3),(3),(4)}。しかし一方、VOR 受信機は、古くからレゾルバーのような機械的な回転部品を含む移相器とトランスを使った位相比較回路等を用いたアナログ信号処理によって方位計測を行っていたが、この方法では高い精度を得るのが難しかった。このため、VOR システム誤差に占める受信機誤差の割合が送信装置の誤差に比べて大きくなってきた。そこで、最近の VOR 受信機では、零クロス点検出法によって基準および可変位相信号の30 Hz 正弦波信号を方形波に変換し、この2つの方形波の位相差を計測して方位を求めるデジタル VOR 信号処理方式が多く使われるようになって、方位角計測精度は大幅に改善された^{(5),(6)}。しかし、この方法では、VOR 受信機で得られる基準位相信号および可変位相信号に不要信号成分や雑音、ある

* 正会員 運輸省電子航法研究所(〒181 三鷹市新川6-38-1)

いは直流成分が重畳された場合、これが原因で零クロス点検出誤差が生じて方位角度誤差が生ずる。

我々は、この零クロス点検出法の欠点を改善する方法として、基準および可変位相信号のそれぞれに同期した方形波のチョップ信号を発生させて、両チョップ信号の位相差から VOR 受信方位角度を計測する方法を考案した。

2. 従来型 VOR 受信機の概要

VOR は、108~117.975 MHz 帯の周波数を使用し、基準位相と可変位相の複合信号の変調波として伝送する。両信号は、受信機で分離・復調できるように、一方は30 Hz 信号で搬送波を振幅変調し、他方は30 Hz 信号で周波数変調（変調指数：16，最大周波数偏移：±480 Hz）された9960 Hz の副搬送波で搬送波を振幅変調している。

図1 VOR 受信機系統図

図1は、従来のアナログ信号処理による VOR 受信機の系統図で、高周波部と信号処理部で構成される。

受信された高周波信号は、高周波増幅器、周波数変換器、中間周波増幅器を経て検波器に入り、検波出力として次の2つの信号の複合信号が得られる。

- (a) 周波数変調された9960 Hz±480 Hz の信号
- (b) 30 Hz の信号

この検波出力は VOR 信号処理部に入り、両信号はフィルタで分離される。(a)の FM 信号は、復調されて30 Hz 信号となり、コース設定用の移相器を介して位相差検出器に入る。位相差検出器では、(b)の30 Hz 信号との位相差に比例した直流出力が得られるので、これをもとに設定コースに対する偏位値を指示する。

コース指示器には、コース設定用のシンクロ・レゾルバーが内蔵されており、レゾルバーのロータと連結され

たコースノブを回転して希望のコースを設定する。

しかし、この処理方式は、上述したようにコース設定用の移相器に機械的な回転部品を含むことから高精度化が難しい。

3. 零クロス検出法によるデジタル VOR 信号処理方式

一方、最近の VOR 受信機では、基準および可変位相信号の零クロス点を検出して方形波に変換し、その方形波の位相差をデジタル的に求める信号処理方式が広く使われている。

図2 デジタル VOR 信号処理回路系統図

デジタル VOR 信号処理回路の構成は図2に示す通りで、図3はデジタル VOR 信号処理回路の各部の動作を説明する波形図である。

(a), (c)は、分離・復調された30 Hz 正弦波の基準および可変位相信号である。それぞれの信号は、零クロス検出器を通して、負電位から正電位に変わる零クロス点を立ち上がり点とし、正電位から負電位に変わる零クロス点を立ち下がり点として得られる(b)および(d)に示す零クロス信号（方形波）に変換され、ゲート回路に入力される。ゲート回路では、この基準と可変位相信号の位相差に等しい幅をもった(e)に示す位相ゲート出力

が作られて、この信号で開いたゲートを通過するクロック発生器からのクロック信号、すなわち(f)に示す位相差クロックをカウントする。このときのカウンタ数が受信方位を示す。30 Hz 信号の位相差を1/100度の分解能で計測するために必要なクロック信号の周波数は、 $360 \times 100 \times 30 = 1.08 \text{ MHz}$ である。

図3 ディジタル VOR 信号処理回路波形図

図4 零クロス点検出方式の位置検出誤差

この零クロス検出法では、信号に雑音や波形歪み、直流成分などの不要信号が重畳されると、計測誤差が発生しやすい。

図4は、零クロス検出法で波形歪みなどの不要成分によって誤差が発生する様子を示す。(a)は30 Hz 正弦波の入力信号で、(b)はその零クロス信号である。入力信号に(c)の破線で示す2倍の高調波信号が重畳されて実線で示すように波形歪みが生じている場合、その出力方形波は(d)に示す零クロス信号になる。また、(e)は不規則な雑音、(g)は直流成分が重畳した場合で、出力方形波はそれぞれ(f)および(h)のようになる。

このように、基準または可変位相信号、あるいはその両方に不要信号成分が重畳された時は、VOR 受信方位角に誤差が生ずることになる。

このため、零クロス点検出法による VOR 受信機では、零クロス点検出回路の前に必要な基準または可変位相信号を選択的に通過させる急峻な特性をもった30 Hz バンドパスフィルタを挿入する方法で、不要信号成分の影響を小さくしていた。しかし、このような方法では、使用部品の定数の温度あるいは経時的な変化等を十分に考慮して回路設計する必要がある、高い計測精度を得ることが非常に困難であった。

そこで、この点が改善できるディジタル PLL 方式を考案した。

4. ディジタルPLL方式VOR信号処理装置

4.1 ディジタル PLL 方式の動作原理と特徴

基準および可変位相信号に対して、それぞれの基本信号成分に位相同期した方形波を作り、両方形波信号の位相差から VOR 受信方位角を計測すれば、不要信号成分の影響を軽減することができる。

図5は、ディジタル PLL 方式において、入力信号に位相同期した方形波のチョップ信号が得られる様子を示す。(a)は30 Hz 正弦波の基準または可変位相信号入力、(b)はチョップ信号で、入力信号をチョップして(c)のチョップ出力と(d)のチョップ反転出力に分け、(d)の位相を反転して(c)と合成して(e)の合成出力を得る。そこで、合成出力の電圧平均値 V_0 を求め、この V_0 が常に零になるように方形波のチョップ信号の位相を制御する。同図の(I)~(III)は、チョップ信号が入力信号に位相同期するまでの状態変化を示す。

図5 デジタル PLL 方式の位相同期説明図

図6 デジタル PLL 方式の位相誤差軽減効果

次に、このデジタル PLL 方式による不要信号成分等の影響除去効果について考える。

図6(a)はデジタル PLL 方式の入力信号、(b)はこれに同期したチョップ信号で、(c)は入力信号をチョップして得られた合成出力を示す。(b)が(a)に同期している時は、(c)の電圧平均値は零である。

いま、入力信号(a)に(d)の破線で示す2倍の高調波信号が重畳されて、実線のように歪みが生じている場合を考える。この場合のチョップ出力は、(d)の破線で示す調波成分のチョップ出力(e)と入力信号のチョップ合成出力(c)との和である。ところが、調波成分のチョップ出力は、入力信号に対してどのような位相関係で重畳されている場合でも、その振幅の電圧平均値は常に零となる。従って、チョップ合成出力の電圧平均値によって制御されるチョップ信号の位相は、重畳されている2倍の高調波信号の影響を受けないことになる。なお、このような特徴は、4倍、6倍等の偶数倍の高調波信号でも同様である。

次に、入力信号に周期性をもたない雑音が重畳された場合について考える。一般に雑音信号の振幅平均値は零と考えてよい。従って、(f)に示す雑音成分のチョップ出力(g)の電圧平均値は零となって、この場合もチョップ信号の位相制御動作に影響を与えない。

また、入力信号に(h)の破線で示す直流成分が重畳されている場合を考えると、この場合の直流成分のチョップ出力(i)の振幅平均値は零となるため、上と同様にチョップ信号の位相制御動作に影響を与えない。

4.2 試作装置の回路構成

デジタル PLL 方式を使った試作装置の回路構成を図7に示す。30 Hz 正弦波の基準および可変位相信号がそれぞれのチョッパ回路に入力されると、方形波のチョップ信号が正の時は出力端子Jに、零の時は出力端子Kにそれぞれチョップ出力が得られ、Kの信号は位相反転回路で位相を反転させ、Jの信号と波形合成回路で加算される。この合成出力は、平均値検出回路で平均化して電圧平均値 V_0 を得る。この電圧平均値 V_0 は、A/D変換器でデジタル化されて可変分周器の分周数を V_0 に応じて変化させる。可変分周器は、電圧平均値 V_0 が零の時は分周数が正確に36000となり、正のときは36000より大きく、負のときは36000より小さくなるように調整されており、図6に示す方形波のチョップ信号を作る。従って、電圧平均値 $V_0 = 0$ のとき、クロック周波数は1.08 MHz であるので、チョップ信号の周波数 F_1 は30 Hz となり基準位相信号に同期する。また、電圧平均値 $V_0 > 0$ のとき、周波数 $F_1 < 30$ Hz となり、電圧平均値 $V_0 < 0$ のとき、周波数 $F_1 > 30$ Hz となるため、基

図7 デジタルPLL方式VOR信号処理回路系統図

準位相信号の位相に対してチョップ信号の位相は遅れあるいは進みの方向に変化する。この結果、チョップ信号の位相は、入力信号に対して常に90度の位相遅れで同期するように制御される。

このようにして、基準および可変位相信号それぞれに同期するチョップ信号が得られる。従って、基準位相信

図8 方位誤差特性

図9 方位誤差特性 (零クロス点検出方式)

受信機入力レベル
-50 dBm

-90 dBm

-100 dBm

-110 dBm

図10 受信機検波出力波形

号と可変位相信号の位相差で求められる VOR 受信方位角は、両者のチョップ信号の位相差に等しく、このチョップ信号をもとに作ったゲート信号でこれを通過するクロック数をカウントすることによって受信方位角度が求められる。

4.3 試作装置の基本性能

図8は、アナログ VOR 信号処理回路を使った従来型の VOR 受信機とデジタル PLL 方式による試作装置の方位誤差特性を示す。

同図(a)の従来型 VOR 受信機では、4分円誤差（一周で4つのピーク点を持つ周期的な誤差）が大きく、幅で約1度の誤差が生じている。これは、主として機械的な回転部品等に起因する誤差と考えられる。

一方、同図(b)の試作装置では、誤差は幅で0.1度以下と非常に良好な結果が得られた。

また、図9は、零クロス点検出方式による VOR 信号処理装置の方位誤差特性例を示す。この場合も、誤差はデジタル PLL 方式とほぼ同様に幅で0.1度以下であった。

このように、デジタル VOR 信号処理方式では、機械的な回転部品を含まないため、方位計測精度が大幅に改善できる。

次に、VOR 受信機の高周波信号入力レベルを変化させたときのコース変動特性を測定した。

図10は、受信機の入力レベルを変えたときの検出力波形で、9960 Hz $\pm$ 480 Hz の FM 信号成分と30 Hz 信号成分の複合信号を示す。なお、-50 dBm は受信機を校正するときの標準入力レベル、-90 dBm は受信機の規格値の最低受信感度レベルである。

図11は、受信機の高周波入力レベルを-40 dBm から-110 dBm まで変えたときのデジタル VOR 信号処理装置のコース変動特性を示す。同図(a)は零クロス検出方式、同図(b)はデジタル PLL 方式の測定結果である。

零クロス検出方式では、-40 dBm $\sim$ -80 dBm の範囲ではコース変動幅が約0.4度とやや大きい。また、-90

(a) 零クロス点検出方式

(b) デジタル PLL 方式

図11 コース変動特性

dBm では変動幅が約0.7度と増加し、-110 dBm では5度以上になった。

一方、デジタル PLL 方式では高周波入力レベルが-40~-90 dBm の範囲ではコースの変動幅が0.2度以内と安定で、-110 dBm でほとんどノイズレベルに近い場合でも、コース変動幅が1.5度程度であった。

このように、デジタル PLL 方式では零クロス検出方式に比べて、弱電界域においても高精度で安定性も高いことが分かった。

5. む す び

VOR システムのなかで、受信機誤差は最も大きな方位誤差要因の1つであったが、最近のデジタル信号処理方式を用いた VOR 受信機は、従来のアナログ信号処理方式に比べて方位計測精度は大幅に良くなった。しかし、現在広く使われているデジタル処理のほとんどが零クロス検出方式を使っているため、弱電界域などで方位特性が不安定になりやすく、高い計測精度を得るのが難しい。そこで、このような弱電界域や不要信号成分が重畳した場合でも安定な方位特性が得られる新しい VOR 信号処理装置を開発して性能試験を行った。

その結果、デジタル PLL 方式を使った試作装置では、方位誤差特性が0.1度以下で、また、弱電界域における方位変動も大幅に改善できることが分かった。

このように、デジタル PLL 方式は、零クロス検出方式がもつ欠点を除去して、しかもデジタル信号処理の利点を十分に生かせる有効な方式と考える。

今後は、各種の不要信号成分が重畳したときの特性比較と、実際の飛行状態における方位特性等の試験を行って、本方式の有効性を確認したい。

謝 辞

本試作装置は、当研究所設置技術研究室長の田中修一氏と共同で開発したもので、本論文の執筆にあたって色々とご意見を頂きました。ここで謝意を表します。

参 考 文 献

- (1) 長岡, 田中, 松田, 山本, 二瓶: “SSB 方式および DSB 方式ドプラ VOR のコース誤差について”, 電子航法研究所報告, No.30, (昭56-02)
- (2) 二瓶, 長岡, 田中, 山本: “DSB 方式ドプラ VOR とその性能について”, 電子航法研究所報告, No.37, (昭57-02)
- (3) 田中, 二瓶, 長岡: “DSB 方式ドップラー VOR の近距離 モニタ”, 電子情報通信学会論文誌B-Ⅱ, (平1-07)
- (4) 二瓶, 田中: “ドップラー VOR の新型切換給電装置”, 第23回電子航法研究所発表会講演概要, p. 41~44, 平成3年
- (5) 二瓶, 長岡, 田中: “デジタル処理 VOR 受信装置の試作”, 第6回電子航法研究所発表会講演概要, p. 17~20, 昭和49年
- (6) 二瓶, 長岡, 田中: “実験用 VOR 信号処理装置の試作”, 第9回電子航法研究所発表会講演概要, p. 17~20, 昭和52年

質 疑 応 答

橋本 進(東京商船大学): 説明の中の発信局の方位の基準が「磁北」とされていますが、「真北」ではないのですか。

二瓶子朗: 航空航法システムではすべて磁北を基準として運用されております。従って、VOR も磁北を基準とした方位情報を送信しております。

石村信道(神戸商船大学): この研究の背景について、もう少し詳しく説明して頂けますか。

二瓶子朗: VOR 装置を使用する上での誤差要素として、地上装置誤差、機上装置誤差、パイロット操縦誤差があります。

このうち、地上装置の誤差については、当研究所の研究成果を生かした DSB 方式ドップラー VOR の採用で、方位精度が大幅に改善されました。

一方、VOR 機上装置については、防衛庁向けの一部を除いて国内では生産されておりませんし、研究もされていませんでした。このため、実験用の VOR 受信機としては、もっぱら外国製品を購入して使っていました。しかし、研究が進んで地上側送信装置の方位精度が良くなるに従い、飛行実験等で使用する受信機の誤差が大きいことが問題でした。そこで、高精度な方位計測ができる VOR 信号処理装置を開発する必要がありました。

また、パイロット操縦誤差については、オートパイロットを装備することで大幅に改善できます。