

周波数標準装置の概要と特徴
An Outline of the Frequency Standard Unit and its Characteristics

石井 宏明*、九谷 昌治*、富松 信右**
ISHII Hiroaki*, KUTANI Masaharu* and TOMIMATSU Shinsuke**

Abstract

Highly precise frequency signals and time code signals are required for the operation of satellites and ground stations. At CDAS, the Frequency Standard Unit has been providing highly precise, stable reference frequency signals and time code signals to various items of ground equipment for the MTSAT. In March 2010, the Frequency Standard Unit was replaced with a new one incorporating the latest technology. This report will introduce the features and performance of the Frequency Standard Unit.

要旨

人工衛星及び地球局の運用においては、精度の高い周波数信号及び時刻信号が要求される。気象衛星通信所（CDAS：Command and Data Acquisition Station）では、周波数標準装置が運輸多目的衛星（MTSAT：Multi-functional Transport SATellite）用各種地上設備へ高精度、高安定な基準周波数信号及び時刻信号を供給している。2010 年 3 月、本装置は最新の技術を採用した新たな装置へ更新された。本稿では本装置の機能と性能について紹介する。

1. はじめに

周波数標準装置は、CDAS にある各機器に必要な高精度、高安定な基準周波数信号及び衛星のスケジュール運用や装置間の時刻同期の為に正確な時刻信号を供給する重要な装置である。前装置は平成 13 年 2 月に更新整備されたが、装置老朽化に伴い平成 22 年 3 月に更新された。

本装置更新では、基準周波数の原振にルビジウム発振器を採用し、必要な精度を確保するとともに保守性及び汎用性のあるシステム構成とし、更に GPS（Global Positioning System）信号受信による基準周

波数の補正機能、NTP（Network Time Protocol）方式による時刻信号の供給機能を追加した。

2. システム概要

2.1 装置構成

本装置は、周波数標準部、時刻標準部及び監視部から構成され、主要な各部は冗長構成とし、障害発生時にも運用を停止する事無く、基準周波数信号及び時刻信号を安定して供給できる構成となっている。

図 1 に装置外観、図 2 に装置構成、図 3 に装置系統を示す。

*気象衛星センター情報伝送部施設管理課（現 気象庁予報部情報通信課）

**気象衛星センター情報伝送部施設管理課（現 関西航空地方気象台観測課）

（2010 年 12 月 3 日受領、2011 年 5 月 19 日受理）

周波数標準部は高精度な基準周波数を、時刻標準部は時刻信号を CDAS 内の各装置に供給している。

また、監視部は本装置各部を監視し、機器障害発生時にアラームを鳴動させる。



装置本体

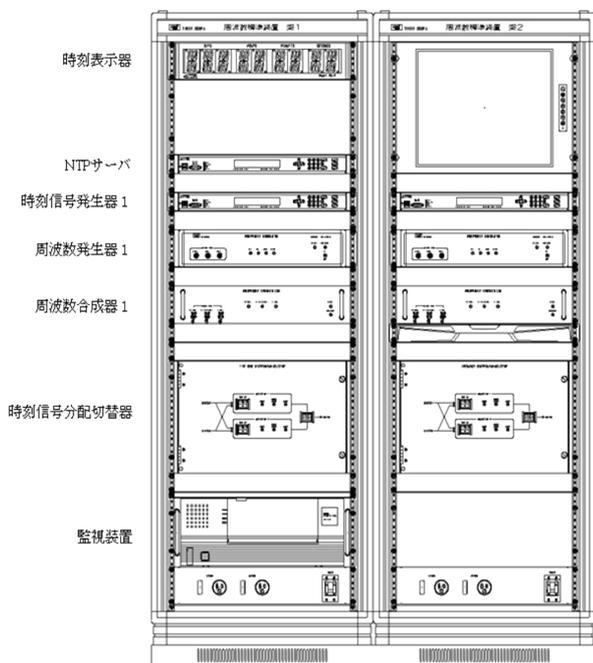


1系アンテナ

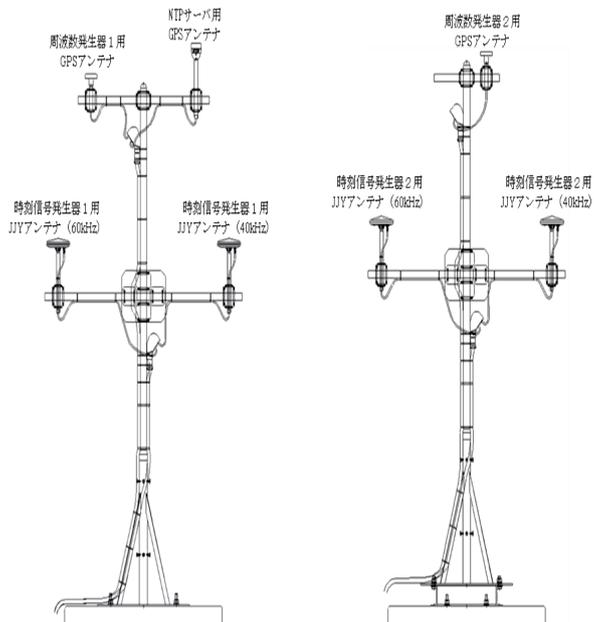


2系アンテナ

図1 装置外観図



装置本体



1系アンテナ

2系アンテナ

図2 装置構成図

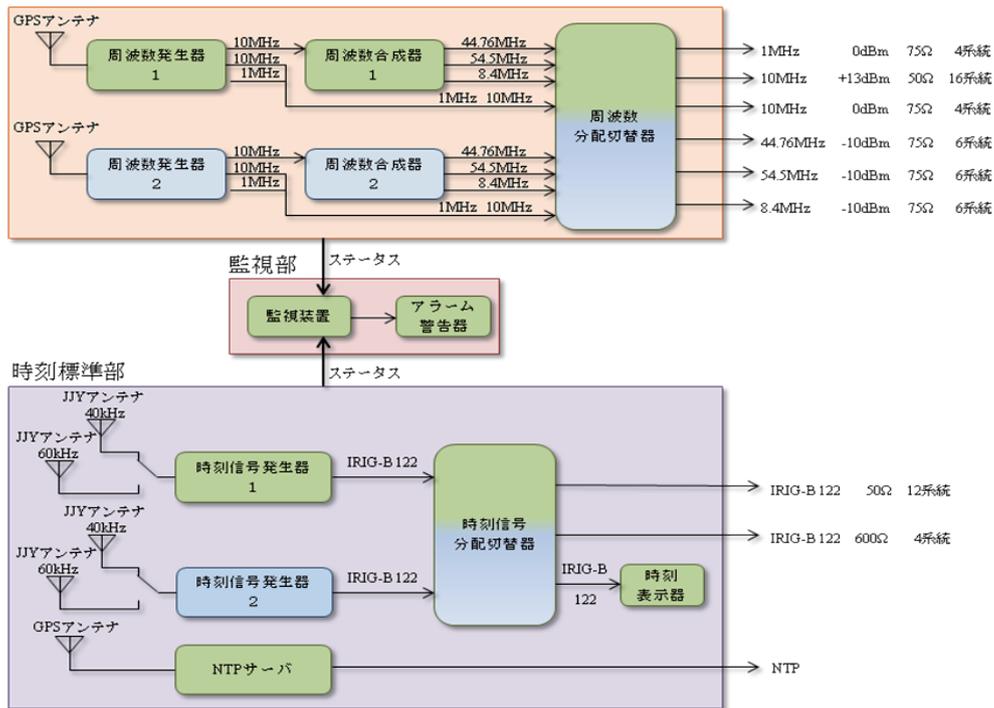


図 3 装置系統図

2.2 周波数標準部

周波数標準部は、周波数発生器、周波数合成器及び周波数分配切替器から構成される。

周波数発生器では、基準周波数の原振にルビジウム発振器を使用し、さらに、GPS を用いて周波数の精度を高め、1MHz 及び 10MHz を発振し、周波数合成器及び周波数分配切替器へ供給している。

周波数合成器では、周波数発生器から入力された 10MHz の周波数を基準に 44.76MHz、54.5MHz 及び 8.4MHz の周波数を生成し、周波数分配切替器へ供給している。

周波数分配切替器では、周波数発生器及び周波数合成器から入力された 1MHz、10MHz、44.76MHz、54.5MHz、8.4MHz の周波数信号を CDAS 各装置へ供給している。

2.3 時刻標準部

時刻標準部は、時刻信号発生器、時刻信号分配切替器、NTP サーバ、時刻表示器から構成される。

時刻信号発生器では、40kHz 又は 60kHz の長波 JJY^{*1} 信号を受信し日本標準時へ同期較正を行い、IRIG^{*2}-B122 形式の時刻信号を生成し時刻信号分配切替器へ供給している。

時刻信号分配切替器では、時刻信号発生器から入力された IRIG-B122 形式の時刻信号を CDAS 各装置へ供給している。

NTP サーバでは、GPS 信号を受信し世界標準時へ同期較正して、正確な時刻信号を LAN 経由で CDAS 内の各装置に供給し、時刻を較正している。

時刻表示器では、1 月 1 日からの通算日、時、分、秒を表示する。

*1 JJY：標準電波を送信する情報通信研究機構が運用している無線局の識別信号（コールサイン）で、同機構によって商標登録（T4355749）されている。

*2 IRIG：Inter Range Instrumentation Group の略で、アメリカの Inter Range Instrumentation Group の TeleCommunication Working Group（TCWG）が 1956 年に異なるタイムコードのフォーマットを標準化する為に規定した直列時刻コードである。

2.4 監視部

監視部は、監視装置、アラーム警告器から構成される。

監視装置では、現在又は過去の各機器状態をディスプレイに表示する。

アラーム警告器では、各機器で障害が発生した時、監視装置の制御により警報を発し、障害発生を運用者に知らせる。

3. 機能

3.1 装置全体

本装置は、CDAS に設置されている各装置へ 1MHz、10MHz、44.76MHz、54.5MHz、8.4MHz の周波数及び IRIG-B122 形式の時刻信号を出力し、NTP 方式で時刻を較正する機能を有する。

本装置は、ホットスタンバイ方式の冗長構成であり、主系に障害が発生した場合は瞬時に自動で従系に切り替わる機能を有している。なお、周波数分配切替器及び時刻信号分配切替器については、機器内部の各ユニット単位で冗長構成となっている。

電源については、主系・従系で分かれており、監視装置、時刻表示器及びディスプレイに関しては、運用系から供給する構造となっている。(図4 電源系統図参照)

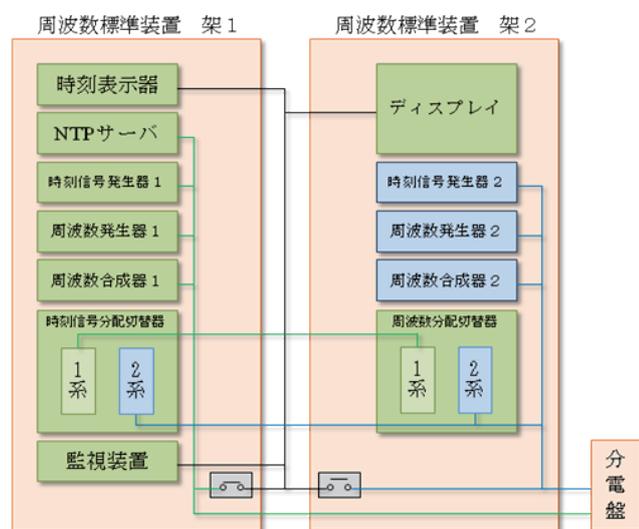


図4 電源系統図

3.2 周波数標準部

(1) 周波数発生器

基準周波数の原振にルビジウム発振器を用いて温度制御型水晶発振器（OCXO：Oven Controlled Xtal Oscillator）を制御（5. 原子周波数標準器 参照）し、更に GPS 信号を受信する事により発生する 1PPS（Pulse Per Second）信号にこの発振器出力を同期させる事により周波数補正を行い、高確度、高安定な 1MHz 及び 10MHz の基準周波数信号を生成している。

一般に、原子周波数発振器を用いる事により短期安定度が改善され、また GPS 信号を用いる事により長期安定度が改善されるが、本装置はこれらの長所を活かして短期、長期ともに高安定な基準周波数信号の生成を実現している。

この生成された周波数信号は、1MHz については周波数分配切替器へ、10MHz については周波数合成器及び周波数分配切替器へ出力している。

(2) 周波数合成器

周波数発生器から入力される 10MHz の基準信号から所望の周波数を生成する為、PLL（Phase Locked Loop）方式を利用する周波数シンセサイザを用いて、44.76MHz、54.5MHz 及び 8.4MHz の周波数信号を生成している。

PLL 方式とは基準信号と生成したい周波数信号の位相を比較し、基準信号と同位相の信号を出力する。つまり、基準信号と同精度な周波数信号を生成する方式である。一般に、位相比較器、低域通過フィルタ、電圧制御発振器（VCO：Voltage Controlled Oscillator）、分周器から構成される。本装置では VCO の代わりに、より周波数安定度の高い電圧制御水晶発振器（VCXO：Voltage Controlled Xtal Oscillator）を使用している。図5に示すように基準入力信号を $1/n$ に分周した信号と VCXO の出力信号を $1/m$ に分周したフィードバック信号の位相を位相比較器で比較する。(図6 位相比較概念図参照) 比較された位相差信号は低域通過フィルタに入力さ

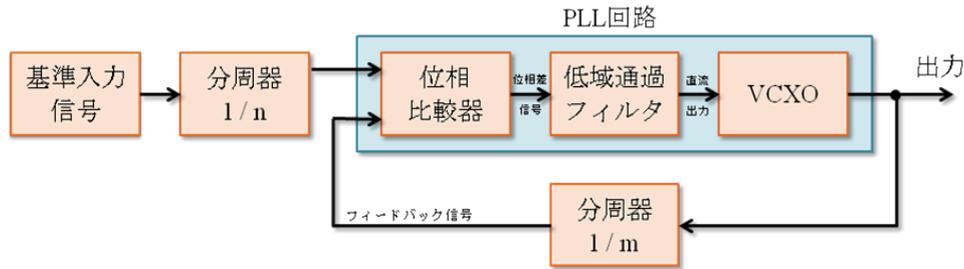


図 5 PLL 回路図

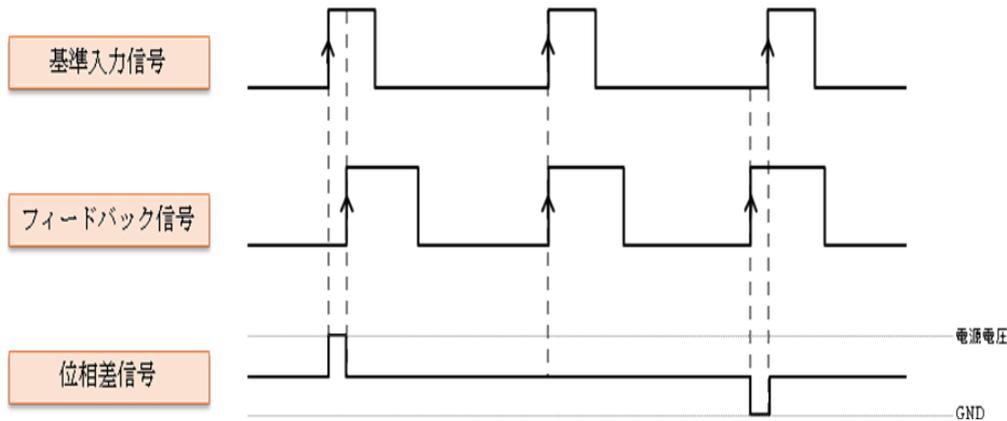


図 6 位相比較概念図

れる。低域通過フィルタでは、高周波成分を除去し直流信号を出力する。

この位相差信号により VCXO の発振が制御され、基準入力信号と同位相の信号を発振するのである。この結果、基準入力信号の m/n 倍の周波数信号が基準入力周波数と同精度で出力される。

(3) 周波数分配切替器

周波数発生器から入力された 1MHz 及び 10MHz の周波数信号、また、周波数合成器から入力された 44.76MHz、54.5MHz 及び 8.4MHz の周波数信号を各ユニットに分配し、規格に応じたインピーダンス変換、出力レベル補正を行い、発生する高調波をカットし、CDAS 内の各装置へ出力する。本機器は、切替器内部にユニット単位 (10MHz 用 2 ユニット、他の周波数は各 1 ユニットで 1 系統合計 6 ユニット) の冗長構成となっている。出力レベルに関しては、手動にて $\pm 3\text{dB}$ 変更可能である。

3.3 時刻標準部

(1) 時刻信号発生器

長波 JJY 信号を受信する事で時刻情報を取得している。長波 JJY 信号は、平成 11 年 6 月より運用が開始された福島県大鷹鳥谷山の山頂付近に設置され周波数 40kHz で送信している JJY 信号と、平成 13 年 10 月より運用が開始された佐賀県と福岡県の境界にある羽金山の山頂付近に設置され周波数 60kHz で送信している JJY 信号があり、どちらでも受信可能である。この、長波 JJY 信号から正確な日時に同期し、IRIG-B122 信号を生成し時刻信号分配切替器へ出力する。ここで IRIG-B122 信号とは、ビットレートが 100PPS、正弦波振幅変調、キャリア分解能は 1kHz (1 ミリ秒)、BCD (Binary Code Decimal) コード (DDD・HH・MM・SS) の直列時刻コード信号である。

(2) 時刻信号分配切替器

時刻信号発生器から入力された IRIG-B122 信号を各ユニットに分配し、規格に応じたインピーダンス変換、出力レベル補正を行い、CDAS 内の各装置に出力している。

本機器も周波数分配切替器と同様に、切替器内部にユニット単位（1 系統 3 ユニット）の冗長構成となっている。

(3) NTP サーバ

温度補償型水晶発振器（TCXO：Temperature Compensated Xtal Oscillator）を内蔵し、また、GPS 信号を受信する事で、世界標準時に同期校正し、CDAS 内の各装置（以下、クライアントという。）に正確な時刻を供給する。

ここで、NTP とは、TCP/IP ネットワークに接続されているクライアントが持つ時刻を正しい時刻へ同期する為の通信プロトコルであり、ウェルノウンポートとして 123 番を使用する。ユニキャストだけでなくマルチキャストで複数のクライアントに同時に時刻を提供することも可能である。

NTP は、NTP サーバとクライアント間で往復するパケットの送受信時の直前及び直後に記録された時刻からズレを計測し時刻同期を行う。

NTP サーバの内部時計の時間を T 、クライアントの内部時計の時間を t とする。クライアントから NTP サーバに対し要求パケットを送信した時刻を t_s 、NTP サーバがクライアントから要求パケットを受信した時刻を T_R 、NTP サーバが応答パケットを送信した時刻を T_S 、クライアントが NTP サーバの応答パケットを受信した時刻を t_r とする。往路と復路のパケット伝送時間が等しいと仮定すると、クライアントの時計の遅延時間 τ は以下の式で表わされる。

(図 7 NTP 時刻較正概念図参照)

$$\tau = \frac{(T_S + T_R)}{2} - \frac{(t_s + t_r)}{2} \quad [s]$$

これによりクライアントは時刻を修正する事が出来る。

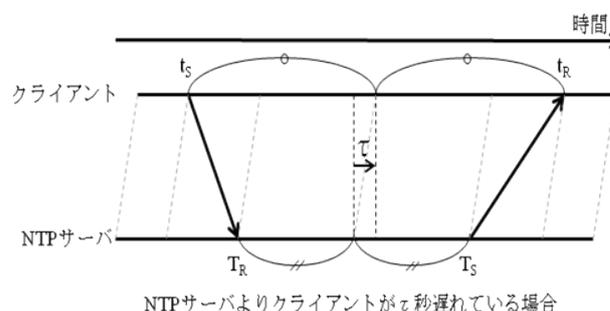


図 7 NTP 時刻較正概念図

(4) 時刻表示器

時刻信号分配切替器から IRIG-B122 信号を入力し、1 月 1 日からの通算日、時、分、秒を表示する。

3.4 監視部

(1) 監視装置

各機器からステータス信号を取得（取得間隔は 1 から 4 秒で設定出来る）し、ディスプレイに運用系を緑色、待機系を水色、メジャーアラーム状態を赤色、マイナーアラーム状態を黄色、メンテナンス状態をマゼンタ色で表示する。このステータス信号は 3 ヶ月間保存し、参照する事が出来る。また、障害が発生した時は、アラーム警告器を作動させる。（マイナーアラーム状態の場合は設定により鳴動する）

(2) アラーム警告器

監視装置からの制御により、マイナーアラーム（設定による）及びメジャーアラーム発生時に鳴動する。また、LED により、通常時は無点灯、マイナーアラーム発生時には黄色、メジャーアラーム発生時には赤色に点灯する。

4. 性能

(6) SSB 位相雑音 (offset 1kHz)

-140dBc/Hz 以下

4.1 周波数標準部

(1) 出力周波数

1.000000MHz、10.000000MHz (原振)

44.766666MHz、54.500000MHz、8.400000MHz

(2) 周波数安定度

$\pm 3 \times 10^{-11}$ 以下

(3) スプリアス (高調波)

-25dBc 以下

(4) スプリアス (非高調波)

-50dBc 以下

(5) SSB 位相雑音 (offset 10Hz)

-120dBc/Hz 以下

4.2 時刻標準部

(1) 出力時刻信号形式

IRIG-B 122、NTP

(2) 受信周波数

40kHz 及び 60kHz (JJY)

1575.42MHz (GPS)

4.3 外部出力インターフェース

周波数標準装置から CDAS 各装置へ供給している信号インターフェースを周波数標準部及び時刻標準部それぞれについて、表1及び表2に示す。

周波数 [MHz]	出力値 [dBm]	インピーダンス [Ω]	No.	外部出力先 装置名
1	0	75	1	通報局装置 DCP復調部 基準周波数分配器 1系
			2	通報局装置 DCP復調部 基準周波数分配器 2系
			3	
			4	
10	13	50	1	MTSAT-1R 画像取得系装置 HRIT変復調器 1系
			2	MTSAT-1R 画像取得系装置 HRIT変復調器 2系
			3	MTSAT-1R 画像取得系装置 疑似イメージャ観測データ変調器 1系
			4	MTSAT-1R 画像取得系装置 疑似イメージャ観測データ変調器 2系
			5	MTSAT-2 テレメトリコマンド装置 10MHzRF分配器 1系
			6	MTSAT-2 テレメトリコマンド装置 10MHzRF分配器 2系
			7	MTSAT-1R 高頻度衛星雲観測システム 基準信号分配装置
			8	MTSAT-1R 高頻度衛星雲観測システム 基準信号分配装置
			9	システムアナライザ
			10	
			11	
			12	
			13	
			14	
			15	
			16	
	0	75	1	衛星震度データ変換装置 周波数制御部 1系
			2	衛星震度データ変換装置 周波数制御部 2系
			3	
			4	
8.4	-10	75	1	中間周波数分配装置 ANT1 1系
			2	中間周波数分配装置 ANT2 1系
			3	中間周波数分配装置 ANT1 2系
			4	中間周波数分配装置 ANT2 2系
			5	
			6	
44.76	-10	75	1	受信周波数変換装置 ANT1 1系
			2	受信周波数変換装置 ANT2 1系
			3	受信周波数変換装置 ANT1 2系
			4	受信周波数変換装置 ANT2 2系
			5	
			6	
54.5	-10	75	1	送信周波数変換装置 ANT1 1系
			2	送信周波数変換装置 ANT2 1系
			3	送信周波数変換装置 ANT1 2系
			4	送信周波数変換装置 ANT2 2系
			5	
			6	

表1 周波数標準部 外部出力インターフェース

フォーマット	出力値 [V _{pp}]	インピーダ ンス [Ω]	No.	外部出力先 装置名	
IRIG-B 122	2.8	50	1	MTSAT-2 テレメトリコマンド装置 IRIG-B分配器 1系	
			2	MTSAT-2 テレメトリコマンド装置 IRIG-B分配器 2系	
			3	MTSAT-1R 高頻度衛星雲観測システム NTP Server 1系	
			4	MTSAT-1R 高頻度衛星雲観測システム NTP Server 2系	
			5		
			6		
			7		
			8		
			9		
			10		
			11		
			12		
			600	1	DCPデータ伝送装置 時刻発生器
				2	
				3	
				4	
NTP	-	-	1	衛星震度データ変換装置 局監視制御部	
			2	回線試験装置	
			3	LRIT復調装置	
			4	波形監視装置	

表2 時刻標準部 外部出力インターフェース

5. 原子周波数発振器

原子周波数発振器は、それぞれの原子固有の共振周波数が安定である事を利用し、水晶発振器の長期にわたる周波数変化を制御する方式の発振器である。主に、セシウムやルビジウムなどの原子を用いた受動型原子周波数発振器、水素などの原子を用いた能動型原子周波数発振器がある。

5.1 発振原理

原子は、中心に原子核があり、その周りに電子が存在している。量子力学によれば、この電子は粒子的な性質だけではなく、波動としての性質も持ち、原子核の周りに雲のように広がったある分布として考えられる。この電子の分布を軌道といい、電子は自由に存在する事が許されず、決まった軌道だけに存在する事が許される。通常は、エネルギーが一番低い軌道を取り、この状態を基底状態といい、これより高いエネルギーを持つ状態を励起状態という。それぞれのエネルギー準位間における電子の遷移を利用しているのが原子周波数発振器である。

図8に示すように、外部からエネルギー準位差に等しいエネルギーの電磁波を照射した場合、吸収され、そのエネルギーを得た電子が励起する。しかし、この状態は非常に不安定であるので、すぐに元の状態へと戻ってしまう。この時、吸収したエネルギー

に等しい電磁波を放出する。この吸収・放出時の電磁波の周波数はボーアの周波数条件により次式で求められる。

$$f = \frac{E_2 - E_1}{h} \text{ [Hz]}$$

f : 周波数 [Hz]

E_1, E_2 : 下準位及び上準位のエネルギー [J]

h : プランク定数 (=6.626×10⁻³⁴) [J・s]

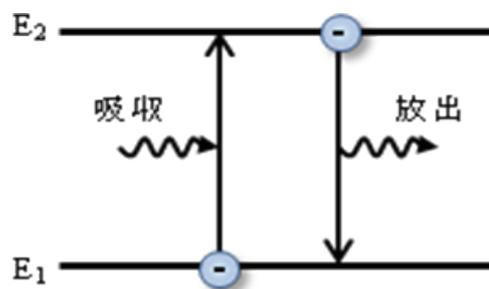


図8 エネルギー準位間の遷移概念図

原振に使われる原子は、主にセシウム、ルビジウム、水素であるが、これら第1族元素は、閉殻の外側に1個の電子を持つ原子なので、理論的扱いが他の原子に比べ容易な為である。

第1族元素の基底状態では、軌道角運動量 $L=0$ であるので、スピン角運動量（電子のスピン角運動量 $S=1/2$ 、原子核のスピン角運動量 I ）を考慮して、全角運動量 F は $I+1/2$ と $I-1/2$ の値を取る。これは、核スピンと電子スピン間の相互作用によって基底状態が分離した状態であり、これを超微細構造と言う。この超微細構造間に相当するエネルギーはマイクロ波領域であり、ボーアの周波数条件から対応する周波数を求められる。

一般に受動型原子周波数発振器は、この周波数に丁度合うよう水晶発振器の周波数を制御し、原子の共鳴周波数に制御された安定な周波数を取り出している。

5.2 ルビジウム周波数発振器

ルビジウム (Rb) は、原子番号が 37 であり、天然に、 ^{85}Rb (72.2%) と ^{87}Rb (27.8%) の2つの同位体が存在する。ルビジウム周波数発振器の原振には、 ^{87}Rb を使用しており、小型で安価という特徴がある。 ^{87}Rb の核スピンは $I=3/2$ なので、基底状態 ($5S$ 軌道) では、 $F=1, 2$ の超微細構造があり、この超微細構造間の遷移に相当する周波数は $6,834,682,612.8\text{Hz}$ である。(図9 エネルギー準位間の遷移概念図参照)

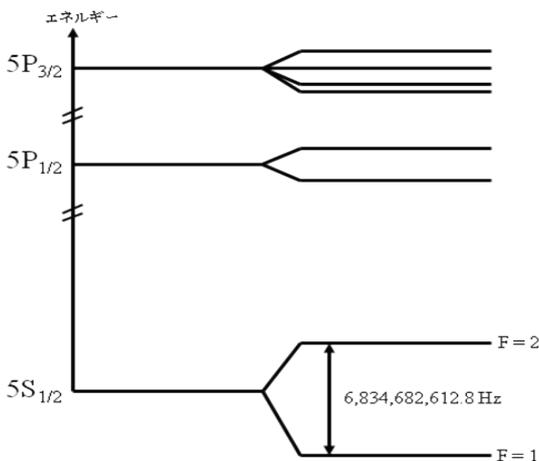


図9 ^{87}Rb エネルギー準位図

以下に動作原理を説明する。(図9 ^{87}Rb エネルギー準位図、図10 ルビジウム周波数発振器回路図参照)

- (1) ^{87}Rb ランプからの放射光を ^{85}Rb フィルタセルに通して、 ^{87}Rb 共鳴セルに照射し光ポンピングを行う。
- (2) 光ポンピングによって基底状態 ($5S_{1/2}$, $F=1$) と基底状態 ($5S_{1/2}$, $F=2$) に均等に分布していた電子のうち基底状態 ($5S_{1/2}$, $F=1$) の電子だけが励起状態 ($5P_{3/2}$) へ励起する。
- (3) 励起された電子は、自然放出により、基底状態 ($5S_{1/2}$, $F=1$) と基底状態 ($5S_{1/2}$, $F=2$) に同確率で遷移する。
- (4) 光ポンピングにより、(2)~(3)を繰り返すうちに、電子は基底状態 ($5S_{1/2}$, $F=1$) に少なくなり、基底状態 ($5S_{1/2}$, $F=2$) に多くなる。つまり、エネルギーの高い準位の方に電子が多い、反転分布状態になる。
- (5) (4)の状態になると、水晶発振器の出力を合成・逡倍し、超微細構造間に一致する周波数のマイクロ波を照射すると基底状態 ($5S_{1/2}$, $F=2$) に存在している電子は誘導放出を起こして、基底状態 ($5S_{1/2}$, $F=1$) へ遷移する。
- (6) 基底状態 ($5S_{1/2}$, $F=1$) へ遷移した電子は再び(1)~(5)の過程を繰り返す。この過程を繰り返す事により、超微細構造間に一致する周波数のマイクロ波が照射されれば、 ^{87}Rb ランプからの放射光は強く吸収され、光検出器への入射光は弱くなる。
- (7) もし、マイクロ波が超微細構造間の周波数に一致しなければ誘導放出は起こりにくくなり、光検出器への入射光量は増加する。従って、光検出器への入射光量が減少するように位相弁別器を用いて水晶発振器を制御する事により超微細構造間の周波数 $6,834,682,612.8\text{Hz}$ に一致し、極めて安定な発振周波数を得る事が出来る。

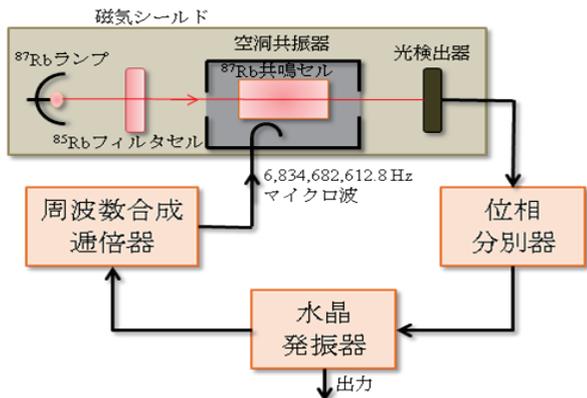


図 1 0 ルビジウム周波数発振器回路図

6. GPS

カーナビゲーションシステム、携帯電話など身近な所で使用されている GPS とは、人工衛星を利用するアメリカ合衆国が開発した全地球測位システムである。地上から 20,200km 上空の円軌道上を周回しており、6 種類の軌道上にそれぞれ 4 機ずつ配置され、合計 24 機（実際には、予備を含めて 31 機の衛星が運用されている。）の衛星から構成されるシステムで、どの位置においても常に 4 機以上の衛星が補足可能である。この GPS 衛星から擬似雑音コード（PRN : Pseudo Random Noise）及び航行メッセージを受信し、正確な位置や時刻同期を行う事が出来る。

6.1 原理

正確な位置を測位する為には、複数の GPS 衛星から同時に測位情報を受信する事が必要である。GPS 衛星が送信している搬送波は、L₁ バンド（1575.42MHz）と L₂ バンド（1227.60MHz）の 2 つあり、PRN コードと航行メッセージを位相偏移変調（PSK : Phase Shift Keying）して送信している。

PRN コードは民生用の C/A コード、より測位精度の良い軍用の P コード、Y コードの 3 種類あり、C/A コードは利用可能で、L₁ バンドで送信されている。GPS 衛星はそれぞれ独自の PRN コードが割り当てられており、決まった周期パターンからなるので、受信している信号がいつどの GPS 衛星から送られて来たのかわかる。

航行メッセージは各衛星の軌道情報、衛星時計の補正值、電離層伝播遅延の補正係数、衛星の状態（故障の有無）などが、伝送速度 50bps で送信されている。

これらのコードは、混信を避ける為に、多重通信、隠匿性に優れたスペクトル拡散通信方式を利用している。

測位原理は、C/A コードにより衛星から受信機までの信号伝播時間、航行メッセージにより衛星の位置が計算出来るので、以下の式を解けばよい。

$$[c(t_i - \delta_i)]^2 = (x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2$$

(x, y, z) : 受信機の位置

(x_i, y_i, z_i) : GPS 衛星 i の位置

t_i : GPS 衛星 i から受信機までの信号伝播時間 [s]

δ_t : 受信機の内蔵時計の誤差 [s]

c : 光速 (=2.99792458 × 10⁸) [m/s]

通常、受信機の位置を計算するには、 (x, y, z) がわかれば良いが、受信機に内蔵されている時計が高精度でなければ誤差が生じる。例えば、内蔵されている時計が 1.0 × 10⁻⁷ 秒誤差があるとすると、光速を掛けて距離に換算すると、

$$1.0 \times 10^{-7} [s] \times 3 \times 10^8 [m/s] = 30 [m]$$

となる。従って、数メートル程度の精度を求める場合、高精度な時刻同期が必要であり、 (x, y, z, δ_t) を求めればよい。このように、4 つの未知数を求める為には、最低 4 機以上の GPS 衛星が受信出来ればよく、連立方程式を解く事により正確な測位及び時刻が分かる。

7. おわりに

気象衛星業務の安定運用に不可欠な本装置の更新に際して、さまざまな人達のご協力により問題なく更新出来た事を、この場をお借りして深く御礼申し上げます。

8. 参考文献

- (1) 東京電波株式会社編：周波数標準装置 取扱説明書
- (2) 東京電波株式会社編：周波数標準装置 完成図
- (3) 高桑健一、2002：新周波数標準装置の概要と特徴、気象衛星センター 技術報告第40号、85-106
- (4) 吉村和昭、安居院猛、倉持内武、2010：図解入門 よくわかる最新 電波と周波数の基本と仕組み[第2版]、秀和システム株式会社