

# **Caracterización del máser de hidrógeno del CAY**

A. Barcia, P. de Vicente

Informe Técnico IT-OAN 2005-8

## Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>2</b>
<b>2. Medidas del ruido de fase</b>	<b>2</b>
2.1. Ecuaciones de las medidas . . . . .	3
2.2. Medidas realizadas . . . . .	4
<b>3. Medidas de estabilidad</b>	<b>5</b>
3.1. Comparación de los máseres 1 y 2 . . . . .	6
3.2. Comparación de los máseres 1 y 3 . . . . .	6
3.3. Comparación de los máseres 2 y 3 . . . . .	7
3.4. Estabilidad de cada máser . . . . .	7
<b>4. Medidas de la sensibilidad magnética</b>	<b>8</b>
4.1. Unidades . . . . .	10
<b>5. Rango y resolución de la sintonía del varactor</b>	<b>11</b>
<b>6. Notas sobre el maser CH1-75</b>	<b>12</b>
<b>7. Puesta en hora</b>	<b>16</b>
<b>8. Fotos</b>	<b>16</b>

## 1. Introducción

En el año 1995 el OAN adquirió a la empresa KVARZ un máser de hidrógeno CH1-75 que se emplea como referencia de tiempo y frecuencia en el Centro Astronómico de Yebes. Antes de recepcionar el máser se realizaron medidas en la fábrica para comparar las características técnicas con las especificaciones del equipo ya que la mayor parte de estas medidas precisan máseres de hidrógeno similares. Este informe describe las pruebas realizadas en noviembre de 1995 en Nizhniy Novgorod. Esta información está registrada desde entonces en el cuaderno de bitácora del máser y para que quede constancia electrónica de ella se describe en este documento.

Toda la información técnica del máser de hidrógeno se puede consultar en el manual del equipo.

## 2. Medidas del ruido de fase

Las medidas se realizaron el 28-11-1995. El montaje se describe en la figura 1

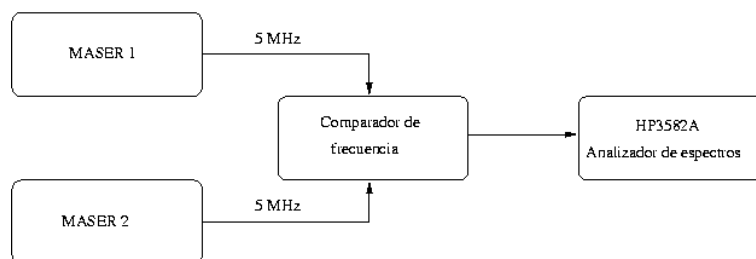


Figura 1: Montaje para medir el ruido de fase de los máseres de hidrógeno.

El comparador de frecuencia CH7-46 funciona como un detector de fase que multiplica por 200 la amplitud del ruido de fase de las dos entradas de 5 MHz. El analizador de espectros HP3582A funciona en banda base muestreando la señal y calculando su transformada de Fourier. Funciona en el rango de 0,02 Hz a 25 Hz y no tiene oscilador local.

La figura 2 muestra un esquema del funcionamiento del comparador de frecuencia CH7-46.

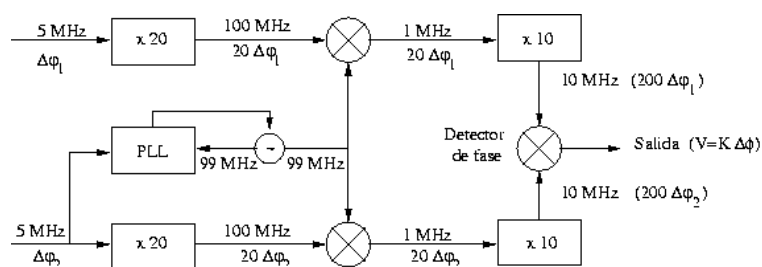


Figura 2: Esquema de funcionamiento del comparador de frecuencia CH7-46.

La tensión de salida  $V$  es,

$$V = K \Delta\phi / \Delta\phi = 200(\phi_1 - \phi_2)$$

donde  $\phi_1$  y  $\phi_2$  son las fases de las señales de 5 MHz de los máseres de hidrógeno que se comparan.

$K$  se determinó introduciendo un offset en frecuencia en uno de los máseres (desenganchando el cristal de 5 MHz) y midiendo la amplitud de la senoide obtenida a la salida del detector de fase en un osciloscopio o el valor eficaz de esa señal en el HP3582A (en dBV). Los resultados obtenidos son:

- Amplitud en el osciloscopio: 0,7 V (-3 dBV).
- Valor eficaz en el HP: 6,5 dBV (0,47 V).

## 2.1. Ecuaciones de las medidas

La tensión de salida del comparador es,

$$V = K\Delta\phi \quad / \quad K = 0,7\text{V/rad}$$

o bien:

$$20 \log K = -3\text{dB(V/rad)}$$

Por tanto,

$$20 \log V = 20 \log K[\text{dB(V/rad)}] + 20 \log \Delta\phi(\text{dBrad})$$

luego,

$$20 \log \Delta\phi(\text{dBrad}) = 20 \log V(\text{dBV}) - 20 \log K[\text{dB(V/rad)}]$$

La ecuación anterior da la diferencia de fase  $\Delta\phi$  medida a la salida del detector de fase. Si la medida se hubiese hecho al nivel de las señales de 5 MHz, para obtener  $\Delta\phi_1$  y  $\Delta\phi_2$  se habría obtenido un ruido de fase  $\Delta\phi^*$  doscientas veces menor:

$$\begin{aligned} 20 \log \Delta\phi^*(\text{dBrad}) &= 20 \log \frac{\Delta\phi}{200} = 20 \log \Delta\phi - 45 \text{ dBrad} \\ &= 20 \log V(\text{dBV}) - 20 \log K[\text{dB(V/rad)}] - 45 \\ &= 20 \log V(\text{dBV}) - 43 \end{aligned}$$

$\Delta\phi$  y  $\Delta\phi^*$  son medidas en banda base (“one-sided”). Para compararlas con las más comunes hechas sobre una portadora (“two-sided”) hay que dividir por 2 la potencia  $(\Delta\phi)^2$  o por  $\sqrt{2}$  la amplitud o valor eficaz  $\Delta\phi$ :

$$\Delta\Phi^* = \Delta\phi^*/\sqrt{2}$$

Por tanto,

$$\begin{aligned} 20 \log \Delta\Phi^*(\text{dBrad}) &= 20 \log V(\text{dBV}) - 43 - 20 \log \sqrt{2} \\ &= 20 \log V(\text{dBV}) - 46 \end{aligned}$$

$\Delta\Phi^*$  está compuesto por la suma estadística de  $\Delta\phi_1$  y  $\Delta\phi_2$  de modo que:

$$\overline{\Delta\Phi^{*2}} = \overline{\Delta\phi_1^2} + \overline{\Delta\phi_2^2} \quad (1)$$

pues  $\Delta\Phi_1$  y  $\Delta\Phi_2$  no están correladas. Como,

$$\overline{\Delta\Phi^*} = \overline{\Delta\phi_1} = \overline{\Delta\phi_2} = 0$$

entonces,

$$\sigma_{\Delta\Phi^*}^2 = \sigma_{\Delta\phi_1}^2 + \sigma_{\Delta\phi_2}^2 \quad (2)$$

y si aceptamos que  $\sigma_{\Delta\phi_1} = \sigma_{\Delta\phi_2}$ , es decir ambos máseres tienen igual ruido, se puede calcular  $\sigma_{\Delta\phi_1}$  y  $\sigma_{\Delta\phi_2}$  dividiendo  $\sigma_{\Delta\Phi^*}$  por  $\sqrt{2}$  o restando 3 dB. Como disponíamos de 3 máseres diferentes preferimos compararlos 2 a 2 y deducir  $\sigma$  sin hacer hipótesis previas.

## 2.2. Medidas realizadas

Se midieron los máseres:

- N/S: 76042 (en adelante máser 2)
- N/S: 76043 (en adelante máser 1). Este es el del OAN
- N/S: 76044 (en adelante máser 3)

combinandolos dos a dos. Las medidas se hicieron a 1 Hz, 10 Hz, 100 Hz, 1 KHz y 10 KHz de la portadora y se recogen en el cuadro 1.

Distancia a portadora Hz	20 log V (dBV)	20 log $\Delta\Phi^*$ (dBrad)	$\sigma_{ij}$	20 log V (dBV)	20 log $\Delta\Phi^*$ (dBrad)	$\sigma_{ij}$	20 log V (dBV)	20 log $\Delta\Phi^*$ (dBrad)	$\sigma_{ij}$
	Combinación 1,2			Combinación 1,3			Combinación 2,3		
1	-67,4	-113,4	$4,6 \cdot 10^{-12}$	-69,2	-115,2	$3,0 \cdot 10^{-12}$	-64,1	-110,1	$9,8 \cdot 10^{-12}$
10	-83,0	-129,0	$1,3 \cdot 10^{-13}$	-83,5	-129,5	$1,1 \cdot 10^{-13}$	-81,6	-127,6	$1,7 \cdot 10^{-13}$
100	-94,2	-140,2	$9,6 \cdot 10^{-15}$	-93,0	-139,0	$10,3 \cdot 10^{-15}$	-93,0	-139,0	$10,8 \cdot 10^{-15}$
1000	-103,0	-149,0	$1,3 \cdot 10^{-15}$	-103,0	-149,0	$1,3 \cdot 10^{-15}$	-103,0	-149,0	$1,3 \cdot 10^{-15}$
10000	-108,0	-154,0	$4,0 \cdot 10^{-16}$	-102,0	-148,0	$15,9 \cdot 10^{-16}$	-105,0	-151,0	$8,0 \cdot 10^{-16}$

Cuadro 1: Medidas de fase de tres máseres de hidrógeno a diferentes frecuencias de la portadora

Se tiene el sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned} \sigma_1^2 + \sigma_2^2 &= \sigma_{12}^2 \\ \sigma_1^2 + \sigma_3^2 &= \sigma_{13}^2 \\ \sigma_2^2 + \sigma_3^2 &= \sigma_{23}^2 \end{aligned}$$

y queda,

$$\sigma_1^2 = \frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2 - \sigma_{23}^2}{2}$$

$$\sigma_2^2 = \frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 - \sigma_{13}^2}{2}$$

$$\sigma_3^2 = \frac{\sigma_{13}^2 + \sigma_{23}^2 - \sigma_{12}^2}{2}$$

Los resultados obtenidos se recogen en el cuadro 2.

Distancia a la portadora	$\sigma_1^2 \cdot 10^{-12}$	$\sigma_2^2 \cdot 10^{-12}$	$\sigma_3^2 \cdot 10^{-12}$
1 Hz	-1,1	5,7	4,1
10 Hz	0,032	0,094	0,080
100 Hz	0,00048	0,00048	0,00055
1000 Hz	0,00063	0,00063	0,00063
10000 Hz	0,00006	-0,00002	0,000099

Cuadro 2: Sigma de tres máseres de hidrógeno a diferentes frecuencias de la portadora

Los resultados negativos pueden deberse a ruido de las medidas. También se ofrecen en dB respecto de la portadora en el cuadro 3.

Distancia a la portadora	$\sigma_1^2$	$\sigma_2^2$	$\sigma_3^2$	Especificaciones
1 Hz	-112	-112	-114	
10 Hz	-135	-130	-131	< -130
100 Hz	-143	-143	-143	< -140
1000 Hz	-152	-152	-152	< -150
10000 Hz	-152		-150	< -150

Cuadro 3: Ruido de fase en dB respecto de la portadora para los tres máseres de hidrógeno a diferentes frecuencias de la portadora

### 3. Medidas de estabilidad

Las medidas se realizaron los días 29/30-11-1995. El montaje se describe en la figura 3.

Las medidas se hicieron por comparación entre sí dos a dos de los máseres de hidrógeno con números de serie 76036, 76042 y 76043 (OAN). Se utilizó otro máser como oscilador local de 5 MHz del contador de frecuencia CH3-64. Este contador se utilizó en modo "TIEMPO" para medir la longitud del periodo de la señal de 1 Hz ( $+\Delta f$ ) obtenida por comparación interna en uno de los máseres de las dos señales de 100 MHz a comparar. Se midieron los máseres:

- N/S: 76036 (en adelante máser 3)
- N/S: 76042 (en adelante máser 2).
- N/S: 76043 (en adelante máser 1). Este es el del OAN

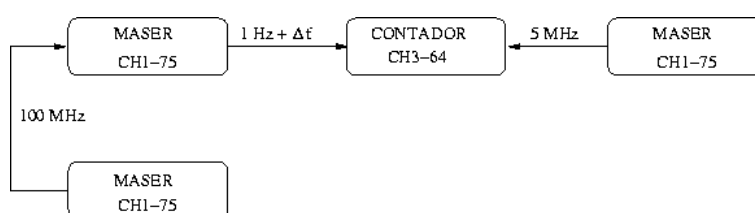


Figura 3: Montaje para medir la estabilidad en frecuencia de los máseres de hidrógeno.

### 3.1. Comparación de los máseres 1 y 2

Se ajustó el sintetizador del máser 1 para que las frecuencias de ambos máseres fueran iguales. Dicho sintetizador fué devuelto a su valor original al final de las medidas para que el máser 1 quedase calibrado a la frecuencia patrón de Rusia recibida en el laboratorio. Se hicieron 3 medidas de frecuencia relativa antes de alterar el sintetizador del máser 1 y otras tres después (tiempo de integración de 100 s). Se utilizó la posición 6950 del sintetizador. El cuadro 4 indica el error en frecuencia entre los máseres 1 y 2 para tres medidas diferentes tomadas con dos valores del sintetizador. Las medidas de estabilidad se resumen en el cuadro 5:

Situación del sintetizador (máser 1)	Error en frecuencia (máser 1/máser 2)
6956 (*)	$7 \cdot 10^{-14}$
	$-5 \cdot 10^{-15}$
	$-6 \cdot 10^{-15}$
6950	$8 \cdot 10^{-15}$
	$-4 \cdot 10^{-15}$
	$8 \cdot 10^{-15}$

Cuadro 4: Error en frecuencia para diferentes valores del sintetizador del máser 1

### 3.2. Comparación de los máseres 1 y 3

No se realizó el ajuste entre las dos frecuencias y no se conoce la cuantía de la diferencia. Por este motivo se espera una  $\sigma_{13}$  algo más alta que el valor real (en los cálculos de  $\sigma_{13}$  se tomó como valor medio del periodo el valor de 1 segundo). No se tomaron medidas con integraciones de 1000 s y 1 hora. Las medidas se resumen en el cuadro 6:

Integración	$\sigma_{12}^2$	$\sigma_{12}^2 / \sqrt{2}$
1 s	$2,2 \cdot 10^{-13}$	$1,6 \cdot 10^{-13}$
10 s	$1,9 \cdot 10^{-14}$	$1,3 \cdot 10^{-14}$
100 s	$4,7 \cdot 10^{-15}$	$3,3 \cdot 10^{-15}$
1000 s	$1,8 \cdot 10^{-15}$	$1,3 \cdot 10^{-15}$
1 h	$1,7 \cdot 10^{-15}$	$1,2 \cdot 10^{-15}$

Cuadro 5: Estabilidad de la combinación de los máseres 1 y 2 para diferentes tiempos de integración

Integración	$\sigma_{13}^2$	$\sigma_{13}^2 / \sqrt{2}$
1 s	$2,6 \cdot 10^{-13}$	$1,8 \cdot 10^{-13}$
10 s	$3,4 \cdot 10^{-14}$	$2,4 \cdot 10^{-13}$
100 s	$5,6 \cdot 10^{-15}$	$4,0 \cdot 10^{-13}$
1000 s	-	-
1 h	-	-

Cuadro 6: Estabilidad de la combinación de los máseres 1 y 3 para diferentes tiempos de integración.

### 3.3. Comparación de los máseres 2 y 3

Se realizó el ajuste previo de la frecuencia de uno de los máseres para tener un error relativo entre ambos  $< 5 \cdot 10^{-14}$ . No se hicieron medidas con integraciones de 1000 s y 1 hora. Las medidas se resumen en el cuadro 7:

Integración	$\sigma_{23}^2$	$\sigma_{23}^2 / \sqrt{2}$
1 s	$2,5 \cdot 10^{-13}$	$1,8 \cdot 10^{-13}$
10 s	$2,6 \cdot 10^{-14}$	$1,8 \cdot 10^{-14}$
100 s	$5,9 \cdot 10^{-15}$	$4,2 \cdot 10^{-15}$
1000 s	-	-
1 h	-	-

Cuadro 7: Estabilidad de la combinación de los máseres 2 y 3 para diferentes tiempos de integración.

### 3.4. Estabilidad de cada máser

Para integraciones de 1 s, 10 s y 100 s se pueden estimar las varianzas individuales  $\sigma_1^2$ ,  $\sigma_2^2$  y  $\sigma_3^2$ . De las relaciones,

$$\begin{aligned}\sigma_1^2 + \sigma_2^2 &= \sigma_{12}^2 \\ \sigma_1^2 + \sigma_3^2 &= \sigma_{13}^2 \\ \sigma_2^2 + \sigma_3^2 &= \sigma_{23}^2\end{aligned}$$



se obtiene,

$$\sigma_1^2 = \frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2 - \sigma_{23}^2}{2}$$

$$\sigma_2^2 = \frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 - \sigma_{13}^2}{2}$$

$$\sigma_3^2 = \frac{\sigma_{13}^2 + \sigma_{23}^2 - \sigma_{12}^2}{2}$$

y aplicando las fórmulas anteriores se obtienen los resultados del cuadro 8:

Integración	$\sigma_1^2$	$\sigma_2^2$	$\sigma_3^2$
1 s	$2,7 \cdot 10^{-13}$	$2,2 \cdot 10^{-13}$	$4,1 \cdot 10^{-13}$
10 s	$4,2 \cdot 10^{-14}$	$-0,6 \cdot 10^{-14}$	$7,4 \cdot 10^{-14}$
100 s	$9,3 \cdot 10^{-15}$	$12,8 \cdot 10^{-14}$	$2,2 \cdot 10^{-14}$

Cuadro 8: Estabilidad de los máseres 1, 2 y 3.

El desajuste entre las frecuencias en la comparación de los máseres 1 y 3 puede estar penalizando los resultados para estos máseres y favoreciendo los resultados del máser 2. Quizá por este motivo se obtiene un valor negativo (absurdo) para este último con 10 s de integración.

Los resultados finales se resumen en el cuadro 9

Integración	$\sigma_1^2$	$\sigma_2^2$	$\sigma_3^2$	Especificación
1 s	$1,6 \cdot 10^{-13}$	$1,5 \cdot 10^{-13}$	$2,0 \cdot 10^{-13}$	$<3 \cdot 10^{-13}$
10 s	$2,0 \cdot 10^{-14}$	?	$2,7 \cdot 10^{-14}$	$<3 \cdot 10^{-14}$
100 s	$3,0 \cdot 10^{-15}$	$3,5 \cdot 10^{-15}$	$4,7 \cdot 10^{-15}$	$<7 \cdot 10^{-15}$
1000 s	$1,3 \cdot 10^{-15}$	-	-	-
1 h	$1,2 \cdot 10^{-15}$	-	-	$<3 \cdot 10^{-15}$

Cuadro 9: Varianza de Allan de los máseres 1, 2 y 3.

## 4. Medidas de la sensibilidad magnética

Las medidas se realizaron el 30-11-1995. Se hicieron aplicando al máser un campo magnético externo vertical (de igual dirección que el campo homogéneo dentro de la ampolla), de sentido ascendente y descendente. Para ello se rodeó el máser de una estructura provista de dos bobinas cuadradas horizontales situadas en la parte inferior y otra en la parte superior del mismo. Previamente se calibró el campo magnético producido en la zona central de la estructura por la corriente de un amperio midiéndolo con una bobina conectada a un voltímetro dinámico (aparato que mide la carga eléctrica acumulada en él al ser recorrido por una corriente): la carga transportada por la corriente inducida en la bobina al aplicarle el campo magnético es proporcional al flujo de ese campo magnético que lo atraviesa (el conjunto bobina-voltímetro es, por tanto, un weber-metro y está directamente calibrado en Webers).

Se hizo una comprobación de la calibración del Webermetro haciendo girar la bobina 180 grados en el campo magnético terrestre. La superficie de la bobina es  $S = 0,159\text{m}^2$  y la variación del flujo medido:  $\Delta\phi = 5,9 \cdot 10^{-6}$  Weber. Por tanto el campo magnético  $B$  obtenido es:

$$B = \frac{\Delta\phi}{S} = \frac{5,9 \cdot 10^{-6}}{0,159} = 3,7 \cdot 10^{-6} \text{ Tesla} = 0,37 \text{ Oe}$$

El campo que se obtiene es el doble del campo magnético terrestre en el lugar, porque el flujo pasa de atravesar la bobina en un sentido a atravesarla en el contrario.

Colocando la bobina en el interior de la estructura en posición horizontal y haciendo pasar por esta una corriente de 1 A se obtuvo:

$$\Delta\phi = 7,2 \cdot 10^{-6} \text{ Wb} \Rightarrow B = \frac{\Delta\phi}{S} = \frac{7,2 \cdot 10^{-6}}{0,159} = 4,5 \cdot 10^{-6} \text{ T} = 0,45 \text{ Oe}$$

Para la medida sobre el máser se aplicó a la estructura una corriente de 2,2 A con objeto de crear un campo magnético  $B=1 \text{ Oe}$ . La frecuencia del máser se comparó con la de uno de los máseres de referencia (situado a 8 m de distancia) llevando la señal de  $1 \text{ Hz} + \Delta f$  a un contador CH3-64 tal y como se muestra en la figura 4.

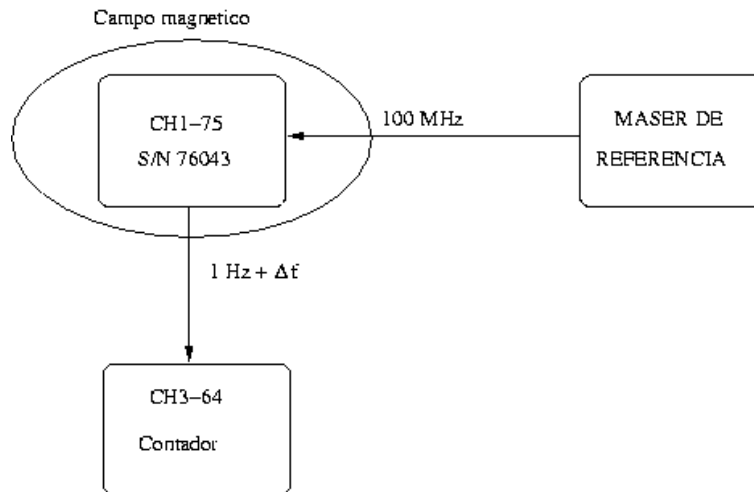


Figura 4: Montaje para medir la variación de frecuencia por influencia de un campo magnético.

Los resultados de las medidas se recogen en el cuadro 10. La segunda columna corresponde a  $1 + \Delta f \cdot 10^8$ .

Por tanto:

$$\left(\frac{\Delta f}{f}\right)_0 - \left(\frac{\Delta f}{f}\right)_\uparrow = 2,7 \cdot 10^{-15} / \text{Oe}$$

$$\left(\frac{\Delta f}{f}\right)_0 - \left(\frac{\Delta f}{f}\right)_\downarrow = 1,8 \cdot 10^{-15} / \text{Oe}$$

Campo magnético (Oe)	Medidas	Media	$\Delta f/f$
0	1.00005638		
0	1.00005615		
0	1.00005623		
0	1.00005621		
0	1.00005707		
0		1,00005641	$56,41 \cdot 10^{-14}$
10 ↑	1.00005495		
10 ↑	1.00005644		
10 ↑	1.00005645		
10 ↑	1.00005578		
10 ↑	1.00005707		
10 ↑		1,00005614	$56,14 \cdot 10^{-14}$
10 ↓	1.00005661		
10 ↓	1.00005591		
10 ↓	1.00005715		
10 ↓	1.00005526		
10 ↓		1,00005623	$56,23 \cdot 10^{-14}$

Cuadro 10: Diferencia de frecuencia para tres campos magnéticos diferentes. El intervalo de medida es 100 s. La resolución del último dígito es  $10^{-16}$

No parece coherente que  $(\Delta f/f)_0 > (\Delta f/f)_\downarrow > (\Delta f/f)_\uparrow$ . Sin embargo en las medidas de estabilidad de frecuencia se obtuvo un  $\sigma_{12} = 4,7 \cdot 10^{-15}$  para un intervalo de 100 s, que corresponde a un valor pico a pico de  $1,41 \cdot 10^{-14}$ . La máxima diferencia medida más arriba,  $2,7 \cdot 10^{-15}$  es mucho menor, lo que indica que en las medidas precedentes es más importante el efecto de la dispersión propia de la medida que la variación debida al campo magnético: para intervalos de medida de 100 s son más importantes las fluctuaciones de frecuencia debidas a la inestabilidad que las debidas a un campo magnético de 10 Oe. Para medir de verdad el valor de la variación debida al campo magnético habrían sido necesarios intervalos de medida mucho mayores, o muchas más medidas para cada valor  $B$ .

#### 4.1. Unidades

La unidad de flujo es el Weber.

La unidad del campo  $H$ :  $A \cdot m^{-1}$ , Oersted, (intensidad)

La unidad del campo  $B$ : Weber  $m^{-2}$ , gauss (densidad de flujo)

$$1 \text{ gauss} = 10^{-4} \text{ Wb m}^{-2}$$

$$1 \text{ Wb m}^{-2} = 1 \text{ Tesla}$$

$$1 \text{ Oe} = 10^3/(4\pi) \text{ A m}^{-1}$$

Si,

$$H = 10 \text{ Oe} = 10^3 / (4\pi) \text{ Am}^{-1}$$

$$B = \mu_0 H = 4\pi 10^{-7} \frac{10^3}{4\pi} \text{ Wbm}^{-2} = 10^{-4} \text{ Wbm}^{-2} = 1 \text{ gauss}$$

y por tanto un campo magnético de intensidad  $H$  igual a 10 Oe tiene una densidad de flujo  $B$  en el vacío de 1 gauss.

## 5. Rango y resolución de la sintonía del varactor

Las medidas se hicieron el 29/11/1995. La cavidad se puede ajustar finamente utilizando el varactor. La posición del varactor está codificada en octal de tal modo que un valor de 0000 corresponde a una tensión de 1 V en el varactor y un valor de 7777 (4096 en notación decimal) a una tensión de 3 V. En las posiciones extremas 0000 y 7777 del DAC, aparece una señal de error para indicar al operador que se está al borde del rango y que no se puede hacer “cavity autotuning”.

Se midió la frecuencia del máser empleando el mismo montaje que en la figura 4 y el contador interno de uno de los máseres. Se eligió el modo de “free run” y un número de 10 periodos de promedio que corresponde a una resolución del contador de  $10^{-4}$ . La tabla 11 resume los valores de frecuencia obtenidos para las posiciones extremas del DAC.

DAC	Frecuencia	Media
7777	0999387	
7777	0999392	
7777	0999403	0999394
0000	1000804	
0000	1000799	
0000	1000799	
0000	1000798	1000799

Cuadro 11: Diferencia de frecuencia + 1 Hz para dos posiciones diferentes del DAC

La diferencia de frecuencia entre ambos valores es:

$$\delta f = (0,999394 - 1,000799) 10^{-8} = 1,410^{-11}$$

y por tanto la resolución es:

$$r = \frac{1,4 10^{-11}}{7777 \text{ (octal)}} = \frac{1,4 10^{-11}}{4096} = 3,5 10^{-15}$$

Por tanto:

Resolución de la corrección:  $3,5 10^{-15}$

Rango de corrección:  $1,4 10^{-11}$

Sentido de la corrección: Aumento de lectura (V)  $\Rightarrow$  Aumento de frecuencia

En Nihzny Novgorod redujeron el flujo de H antes de embalar el máser para tener más estabilidad de frecuencia. Esto modificó la respuesta de la frecuencia a la tensión del varactor. A continuación volvieron a medir dicha respuesta dada por la curva en la figura 5.

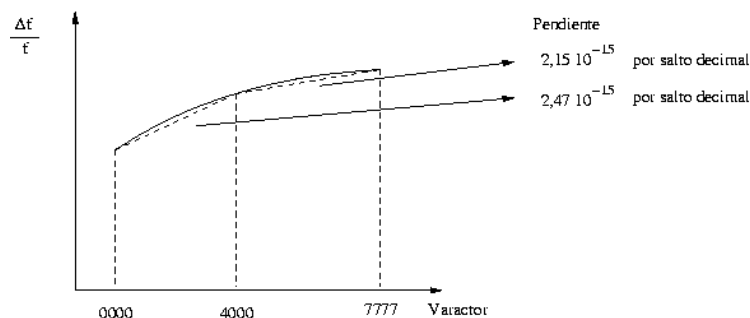


Figura 5: Dependencia de la frecuencia relativa con la posición del varactor.

Al hacer correcciones tener en cuenta que la lectura del visor está en octal, mientras que las anteriores sensibilidades corresponden a un salto de una unidad decimal. El protocolo a seguir para corregir la frecuencia del máser por una cantidad  $\delta f/f$  modificando la cavidad es el siguiente:

- Dividir el salto total ( $\delta f/f$ ) deseado en frecuencia por la anterior sensibilidad (pendiente) para obtener el número de pasos (decimal) a saltar.
- Si la lectura del DAC es inferior a 4000 la pendiente es  $2,47 \cdot 10^{-15}$  por salto decimal. Si la lectura del DAC es superior a 4000 la pendiente es  $2,15 \cdot 10^{-15}$  por salto decimal.
- Pasar la lectura (DAC) del varactor a decimal.
- Sumar o restar a esta lectura el número de pasos calculado (según se quiera subir o bajar la frecuencia). Si  $\delta f/f < 0$  hay que sumar la corrección al antiguo valor del DAC. Si  $\delta f/f > 0$  hay que restar la corrección.
- Pasar el resultado de esta suma a octal e introducirlo en el DAC.

## 6. Notas sobre el maser CH1-75

1. Existen dos recintos de vacío. El recinto más interno (ampolla y elementos conectados a ella), está conectado a la bomba “getter” y a una de las bombas iónicas. La bomba “getter” elimina el hidrógeno, y la bomba de vacío los demás gases. El recinto de vacío más externo está conectado a la otra bomba iónica.
2. HFO (disociador). Puede funcionar con y sin suministro de hidrógeno sin estropearse.

3. El aparato de medida (microamperímetro) de las bombas iónicas indica la suma de las corrientes existentes en ambas. Normalmente la lectura decrecerá con el tiempo (out-gassing). La parte de la corriente de las bombas iónicas debida al flujo de hidrógeno es sólo  $\sim 0,1 \mu\text{A}$ .
4. El ancho de banda del PLL del oscilador de 5 MHz es  $\sim 1 \text{ Hz}$ .
5. El ancho de banda del receptor es  $\sim 5 \text{ KHz}$ . El filtro está situado en la frecuencia intermedia de 40 KHz.
6. El máser ha sido probado en un horno a temperaturas entre +5 C y +40 C para determinar el efecto de la temperatura sobre la estabilidad. La temperatura máxima de trabajo son 35 C (15 C por debajo de la temperatura de regulación de 50 C). El margen de 15 C compensa el calor generado internamente en el máser.
7. El número de serie del máser de Yebes es el 76043 (10.95).
8. La referencia de los conectores TNC del panel posterior (SUHNER) es: Tipo TNC-50-3-52c. Identificador: 643450.
9. La sintonía de la cavidad a la frecuencia de la línea se basa en la ecuación:

$$f_m = f_l + \frac{Q_c}{Q_l}(f_c - f_l) \quad (3)$$

donde  $f_m$  es la frecuencia del máser,  $f_c$  la frecuencia de resonancia de la cavidad,  $f_l$  la frecuencia de la línea en el espacio libre,  $Q_c$  la  $Q$  de la cavidad y  $Q_l$  la  $Q$  de la línea.

$Q_l$  se altera cambiando el flujo  $I$  de hidrógeno o introduciendo un campo inhomogéneo adicional  $H$  en el interior de la ampolla. La variación de  $Q_l$  con  $I$  o con  $H$  viene dada aproximadamente por la curvas en la figura ??.

$Q_{max}$  está determinado por las pérdidas en la cavidad. Existe también un  $Q_{min}$  por debajo del cual deja de haber efecto máser y no se obtiene señal. Cuando  $Q_l$  se altera por un cambio en el valor de  $I$  el rango de valores de  $Q_l$  está dado por:

$$\frac{Q_{max}}{Q_{min}} \simeq 1,3 \rightarrow 2 \quad (4)$$

según las características del paquete físico particular. Cuando el cambio de  $Q_l$  se obtiene por un campo inhomogéneo  $H$ , el máximo rango de variación obtenido es:

$$\frac{Q_{max}}{Q_{min}} \simeq 1,3 \rightarrow 1,4 \quad (5)$$

10. El contador interno de frecuencia del máser tiene una resolución en tiempo de  $10 \mu\text{s}$  (equivalente a un reloj de 100 KHz). En las medidas de comparación de frecuencia entre una señal de 100 MHz y otra de  $100 + \Delta f$  MHz se utiliza la salida  $\Delta f \cdot 10^8$  del comparador interno de frecuencia, por lo que con un intervalo de medida de 1 s, se está midiendo el periodo de una señal de  $1 + \Delta f \cdot 10^8$  Hz con resolución de  $10 \mu\text{s}$  ( $10^{-5}$  s). Por tanto,

- $\Delta T/T$  se mide con resolución de 1 parte en  $10^5$ .
- $\Delta f \cdot 10^8/1 \text{ Hz}$  se mide con esa misma resolución ( $10^{-5}$ )
- $\Delta f/f$  se mide entonces con una resolución de  $10^{-5} \cdot 10^{-8} = 10^{-13}$

Por lo tanto: con intervalo de medida de 1 s, el dígito menos significativo del display corresponde a una resolución de  $10^{-13}$  en la medida del error fraccional de frecuencia.

11. El conmutador del sintetizador (“Frequency Adjustment”) se dejó en la posición 6956 después de haber sintonizado la cavidad en la raya. Cualquier futura variación que se produzca en la frecuencia del máser habrá que atribuirla a cambios en la cavidad (térmicos, vibraciones,...). Las futuras sintonizaciones deberán hacerse sobre la cavidad, no sobre el sintetizador, de modo que la cavidad esté siempre sintonizada a una frecuencia próxima a la de la raya, situación para la que se tiene la máxima estabilidad del máser.
12. El sintetizador se puede controlar desde un dispositivo de ajuste tal que al aumentar la lectura del “thumbwheel switch” se aumenta la frecuencia del máser en la cuantía indicada para cada dígito ( $10^{-11}$ , ..... $10^{-14}$ ).
13. Los campos magnéticos de frecuencia  $> 1 \text{ Hz}$  no modulan la frecuencia del máser debido a que la constante de tiempo de la transición de un átomo es  $\tau \simeq 1 \text{ s}$ . El átomo tiene que estar sometido a radiación de 1420 MHz durante  $\sim 1 \text{ s}$  para que la probabilidad de su transición sea alta por haber sido excitado por un número suficiente de fotones de esa frecuencia (coeficiente de excitación estimulada de Einstein). La ampolla se diseña de modo que los átomos permanezcan en el estado superior  $\sim 1 \text{ s}$  en su interior. El número de fotones se podría incrementar elevando el flujo de hidrógeno hacia la ampolla (más átomos presentes), pero esto aumentaría las colisiones entre átomos y las transiciones indeseadas, reduciendo la potencia disponible y la raya se ensancharía por cambios de spin debidos a colisiones. Un campo magnético alterno de frecuencia  $> 1 \text{ Hz}$  hace cambiar la frecuencia de transición máser del átomo a ese mismo ritmo: en cada instante el átomo está sometido a un campo magnético diferente y la frecuencia a la que se produce la transición máser también es diferente; el número de fotones presentes a esta frecuencia será pequeño y la probabilidad de transición baja. No se producirán transiciones a esta frecuencia y la frecuencia del máser no se modula.
14. Las variaciones de fase debidas a la modulación del máser por un campo magnético exterior son la siguientes. Sea la señal radiada por el máser:

$$A \cos \phi = A \cos(w_0 t + \beta \sin \Omega t)$$

donde,

$$w(t) = \frac{d\phi}{dt} = w_0 + \beta \Omega \cos \Omega t$$

y el campo magnético exterior es

$$H(t) = H_0 \sin \Omega t$$

La sensibilidad (vease la sección sobre la sensibilidad magnética) es  $\simeq 2 \cdot 10^{-15} / \text{Oe}$ ,

$$S = 2 \cdot 10^{-15} = \frac{\beta \Omega}{w_0} = \left( \frac{\Delta w}{w_0} \right)_{\max} = \left( \frac{\Delta f}{f_0} \right)_{\max}$$

por tanto,

$$\beta = \frac{S w_0}{\Omega}$$

La fluctuación de fase es:

$$\sigma_{\Delta\phi}^2 = \frac{1}{2} \beta^2 (\text{rads})^2 = \frac{1}{2} \left( \frac{S w_0}{\Omega} \right)^2 (\text{rads})^2$$

La relación banda lateral/portadora:

$$\left( \frac{\beta}{2} \right)^2 = \left( \frac{S w_0}{2\Omega} \right)^2 (\text{rads})^2 \quad (\text{one - sided})$$

y la relación en dBc:

$$10 \log \left( \frac{S w_0}{2\Omega} \right)^2 (\text{rads})^2 \quad (\text{dBc})$$

Un caso típico es  $H_0 = 10 \text{ Oe}$ ,  $\Omega(50 \text{ Hz}) = 2\pi 50$ ,  $w(5 \text{ MHz}) = 2\pi \cdot 5 \cdot 10^6$ ,  $S = 2 \cdot 10^{-5} / \text{Oe}$ , por tanto,

$$\beta = \frac{2 \cdot 10^{-15} \cdot 2\pi \cdot 5 \cdot 10^6}{2\pi \cdot 50} = 2 \cdot 10^{-10} \text{ rad}$$

La fluctuación de fase es:  $\sigma_{\Delta\phi}^2 = 2 \cdot 10^{-20} (\text{rad})^2$  por tanto  $\sigma_{\Delta\phi} = 1,4 \cdot 10^{-10} (\text{rad})^2$  y el ruido de fase pico a pico es

$$\Delta\phi_{pp} = 4,2 \cdot 10^{-10}$$

rad y la relación en dBc:

$$10 \log \left( \frac{\beta}{2} \right)^2 = 10 \log 10^{-20} = -200 \text{ dBc}$$

Este ruido de fase se transforma tras convertir la señal a 50 GHz ( $10^4$ ):

$$\Delta\phi_{pp} = 4,2 \cdot 10^{-10} \cdot 10^4 = 4,2 \cdot 10^{-6} \text{ rads}$$

$$10 \log(10^{-20} \cdot 10^8) = -120 \text{ dBc}$$

que es un valor despreciable.



15. Pantallas magnéticas. KVARZ compra las planchas de Permalloy y las conforma en tres partes: tapa, fondo y superficie lateral cilíndrica. A continuación les da un tratamiento térmico para recuperar las propiedades magnéticas alteradas durante la mecanización: calentamiento a 1200 C y enfriamiento siguiendo una curva de temperatura/tiempo muy precisa en ambiente de vacío. El enfriamiento de 600 C a 400 C tiene que ser muy rápido (método especial desarrollado por KVARZ)). Con ello se consiguen factores de apantallamiento muy elevados ( $\mu_r \simeq 70000$  para  $H = 0,1 \cdot 10^{-3}$  Oe), frente a  $\mu_r \simeq 25000$  que consiguen otros fabricantes para el mismo  $H$ . Para  $H = 10^{-3}$  Oe se obtienen  $\mu_r \simeq [100, 120] \cdot 10^3$ .
16. Teflón. Lo depositan sumergiendo la ampolla en una solución “líquida” y curando en un horno. Repiten la operación varias veces (3) para hacerlo por capas muy finas y conseguir mayor uniformidad. El espesor total es de 2 a 3  $\mu\text{m}$ . Un mayor espesor daría más longevidad, pero presenta problemas de “outgassing”. Para seleccionar el teflón más estable (menor variación del “wall shift” con el tiempo) hicieron ensayos con varios tipos durante 8 años. No conocen la composición del teflón que utilizan porque la empresa rusa suministradora lo mantiene en secreto.
17. En el interior de la ampolla se aplica un campo homogéneo de 0,3 mOe. Su objeto es orientar por igual los momentos magnéticos de todos los átomos para que se produzca un acoplamiento intenso al radiar y tenga lugar el efecto máser.

## 7. Puesta en hora

El visor de la hora se pone en hora manualmente. No hay posibilidad de arranque automático. El procedimiento a seguir es el siguiente:

- Seleccionar TIME
- Pulsar DIGIT. Se para el contador y señala las horas.
- Pulsar COUNT para seleccionar la hora (incrementos de 1 hora en cada pulsación).
- Pulsar DIGIT para seleccionar los dígitos de minutos.
- Pulsar COUNT para seleccionar el minuto (incrementos de un minuto).
- Pulsar DIGIT para seleccionar los dígitos de segundos.
- Pulsar COUNT para seleccionar el segundo (incrementos de un segundo)
- Pulsar DIGIT para arrancar la cuenta en el momento deseado.

El visor incrementa una unidad al pulsar la tecla DIGIT. Conviene pulsar esta tecla aproximadamente 30 s después de que se haya producido la hora seleccionada en el visor.

## 8. Fotos



Figura 6: Vista frontal del máser.



Figura 7: Vista del panel de control del máser.



Figura 8: Vista posterior del máser. Conectores de entrada y salida.