

Informe técnico N 91

**Velocidad de actualización del oscilador
local del radiómetro instalado en la
Antena I del IAR¹**

J. Vasquez, N. U. Duronea y E.M. Arnal

Noviembre de 2007

**Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas
Universidad Nacional de La Plata**

¹*Monografía presentada como parte de las tareas académicas adicionales para completar requerimientos, a fin de que se considere la materia **Técnicas observacionales radioastrónomicas** como materia de postgrado*

Indice

1	Introducción	1
2	Actualización en frecuencia del oscilador local f_{ol}	2
3	Desarrollo matemático del problema	6
4	Análisis de las ecuaciones fundamentales	10
5	Resultados: aplicación a la Antena I del IAR	10
6	Análisis de los datos	12

1 Introducción

El análisis de las señales radioastronómicas para el estudio científico se lleva a cabo luego de una serie de modificaciones que la electrónica del radiómetro efectúa sobre esas señales.

La Figura 1 muestra un esquema de la electrónica de un radiómetro, desde que recibe la señal de la fuente de observación, pasando por todo el proceso de electrónica. El primer paso en este proceso se llama *etapa de predetección*, en donde básicamente se amplifica la señal original, debido a que su intensidad es en general muy débil. A través de un proceso de “mezcla” con una señal artificial generada por un oscilador local en el *mezclador*, la frecuencia de la señal f_s , se la lleva a frecuencias más bajas, para que de esa forma, y luego de pasar por diferentes etapas y procesos que son los mismos en todos los radiómetros, llevarla a una región en una banda de frecuencias en las que su tratamiento sea mas simple.

La frecuencia de la señal artificial (estable y monocromática), que llamaremos *frecuencia del oscilador local* (f_{OL}) es tal que la suma (o resta) con f_s , da siempre una señal de salida f_{salida} con el mismo valor, independientemente del valor de f_s . De esta forma, toda la electrónica que se utilizan para analizar la señal luego del *mezclador* es la misma. Particularmente, en el caso de la antena I del IAR, el valor de la frecuencia de f_{salida} es de 150 MHz. Esta frecuencia también se la llama frecuencia intermedia (FI).

Las correcciones que se deben aplicar en la electrónica se deben aplicar debido a que los movimientos de rotación y traslación de la Tierra en torno al Sol, los movimiento de este último hacia el Apex en torno al centro galáctico, e inclusive los movimientos de la Tierra respecto al baricentro de los sistemas Tierra-Luna y Tierra-sol, afectan de diferentes maneras la posición en frecuencia de las señales recibidas en el receptor.

En general, esas correcciones dependen de una serie de parámetros relacionados con aspectos técnicos del instrumento o con la posición de la fuente observada en el cielo. Entre los parámetros más importantes encontramos la *temperatura del receptor* T_{rec} , el *número de canales* N_{can} y el *ancho de banda utilizado* B , para la observación de la línea espectral. De B y N_{can} se puede derivar el *ancho de cada canal* $B_{can} = \frac{B}{N_{can}}$; las coordenadas de la fuente, la frecuencia de observación ν_0 , la latitud geográfica de la antena, etc.

La aplicación principal de este trabajo apunta al análisis espectroscópico con alta resolución en frecuencia y en el ajuste de la f_{OL} para obtener determinaciones precisas y confiables de la frecuencia de las señales recibidas.

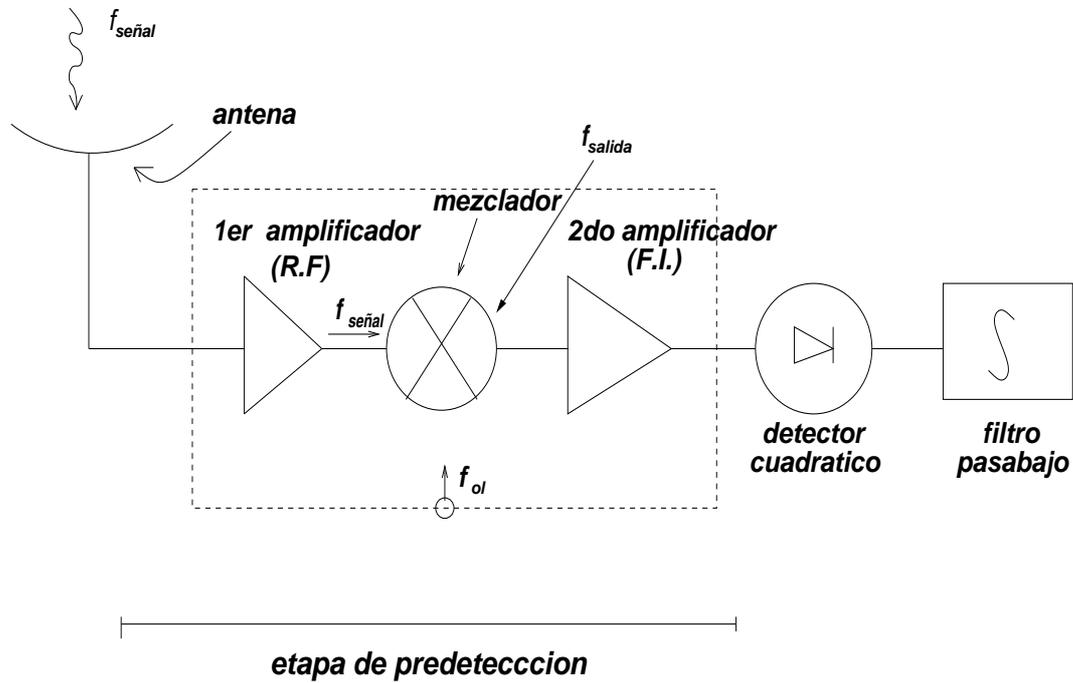


Figure 1: Gráfico esquemático de las principales componentes de un radiómetro.

Table 1: Características generales de la Antena I del IAR

Cobertura del cielo	$-90^\circ \leq \delta \leq -9.1^\circ$
Seguimiento en ángulo horario (t)	$-30^\circ \leq t \leq 30^\circ$
Transiciones observables	1420 MHz (HI), 1612, 1665, 1667, 1720 MHz (OH) 3.300 MHz (CH), Líneas de recombinación
Resolución angular	30' (1420 MHz) y 15' (3.3 GHz)

2 Actualización en frecuencia del oscilador local f_{ol}

Existen efectos de corrimiento en las líneas observadas respecto al que deberían tener producidos por la electrónica del instrumento que afectan la determinación precisa de la posición de la fuente celeste. Ese corrimiento se agudiza al observar la fuente durante un intervalo de tiempo del orden de minutos.

En la Fig. 2 se puede ver esquemáticamente, los distintos procesos que sufre la señal

observada. En este ejemplo se observa una línea espectral centrada en 1420 MHz, sin ningún corrimiento de su posición. Los distintos movimientos de la Tierra, enunciados en la sección anterior hacen que la posición en frecuencia de la señal recibida no sea constante en el tiempo. En la misma figura se puede advertir cómo a través del proceso de mezcla entre f_s con f_{OL} , se “lleva” la señal original a un rango de frecuencias $\Delta\nu \sim 0 - 10$ MHz, pasando por etapas intermedias (“frecuencia intermedia” FI).

Para que la posición en frecuencia de la señal recibida permanezca invariable con el transcurrir del tiempo, se deben aplicar ciertas correcciones en tiempo real, que las podemos discriminar de la siguiente manera

- corrección por rotación terrestre
- corrección por movimiento de traslación terrestre
- corrección por movimiento solar

La corrección por el movimiento de rotación terrestre está dada por

$$v_r = -0.465 \cos(\varphi) \cos(\delta) \text{sen}[\psi(t)] \quad (1)$$

donde φ es la latitud de lugar de observación, δ es la declinación del objeto observado, ψ es el ángulo horario del mismo y t es el intervalo temporal de observación.

La corrección por movimiento de traslación terrestre y movimiento solar se realizaron de acuerdo al trabajo realizado por MacRae & Westerhout (1956) de la siguiente manera:

$$X1 = V(\text{sen}(\lambda) + e \text{sen}(\pi)), Y1 = V(\cos(\lambda) + e \cos(\pi)) \cos(i), Z1 = -V(\cos(\lambda) + e \cos(\pi)) \text{sen}(i),$$

donde X1, Y1 y Z1, las componentes del movimiento orbital de la Tierra en el sistema de coordenadas rectangulares ecuatoriales, $V = na(1 - e^2)^{1/2}$, λ es la longitud ecliptical del Sol, n es la velocidad angular media, a es el semieje mayor de la órbita terrestre, e es la excentricidad, π es la longitud media del perigeo e i es la oblicuidad de la eclíptica.

Sean X2, Y2 y Z2 las componentes del movimiento solar hacia el ápex, éstas estan definidas por

$$X2 = V_0 \cos(A_A) \cos(D_A) \quad Y2 = V_0 \text{sen}(A_A) \cos(D_A) \quad Z2 = V_0 \text{sen}(D_A)$$

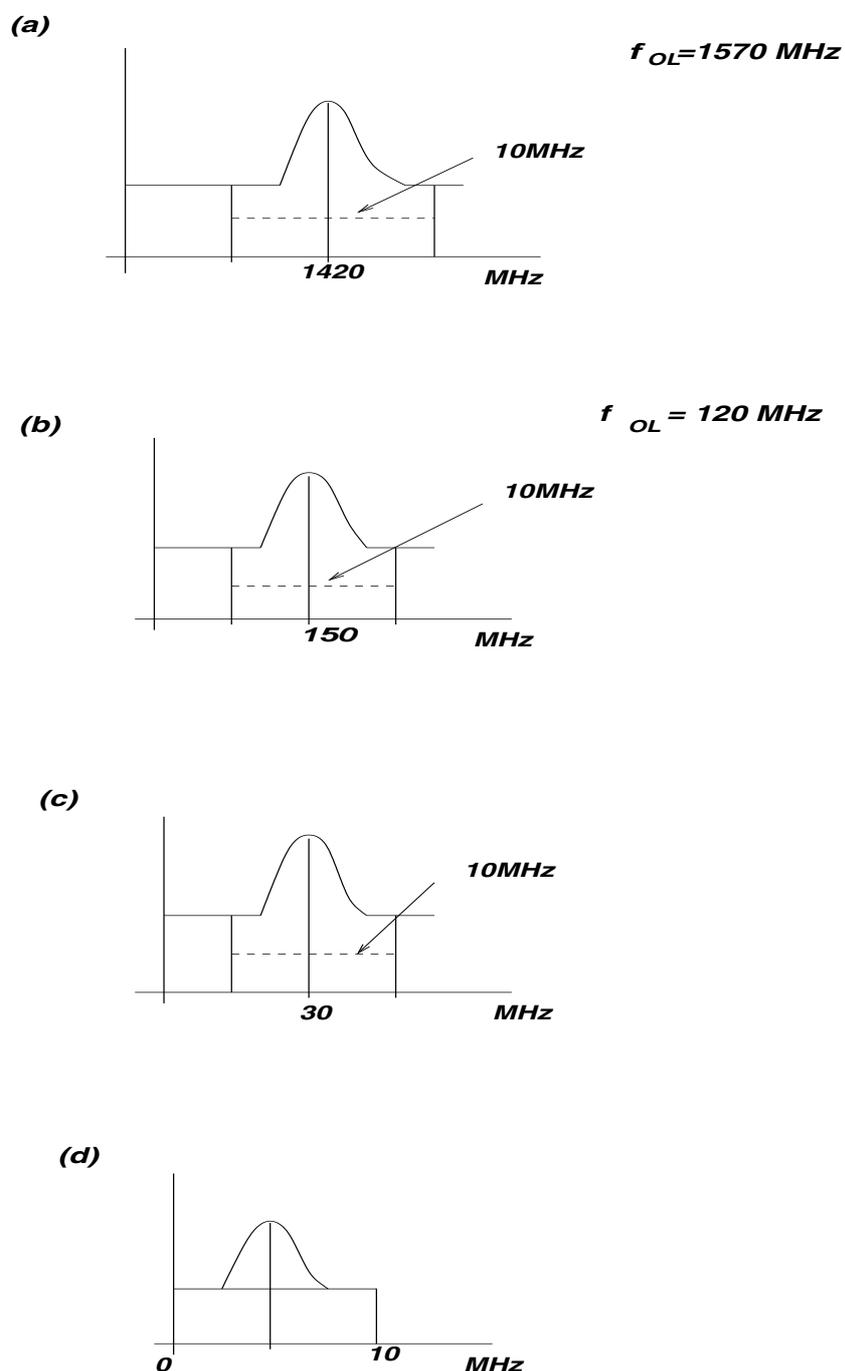


Figure 2: (a) Posición original de la línea observada, centrada en 1420 MHz. La banda de paso de la observación es de 10 MHz. La f_{OL} local es de 1570 MHz. Esa combinación entre ambas señales hacen que f_{OL} se centre en ~ 150 MHz (b), luego pasa por otro proceso de mezcla, que lleva la señal a ~ 30 MHz (c), y finalmente se la lleva a lo que se llama “banda de video”, en donde lleva la señal a un rango de frecuencias entre 0 a 10 MHz (d).

donde $V_0 \sim 20$ km/seg es la velocidad del Sol hacia el ápex de coordenadas (A_A, D_A) . Cuando las componentes de velocidad de la Tierra y de movimiento solar son sumadas se obtienen las componentes A, B y C del vector velocidad de la Tierra respecto del Sistema Local de Referencia (LSR, del inglés, *Local Standard of Rest*):

$$A = A_1 \operatorname{sen}(\lambda) + A_2 \quad B = B_1 \operatorname{cos}(\lambda) + B_2 \quad C = C_1 \operatorname{cos}(\lambda) + C_2$$

donde las constantes A_1, A_2, B_1, B_2, C_1 y C_2 son funciones de los parámetros orbitales mencionados anteriormente y son calculadas para el día de interés. De esta manera, a la velocidad radial medida para un objeto se le debe sustraer la cantidad $v_r = A \operatorname{cos}(\delta) \operatorname{cos}(\alpha) + B \operatorname{cos}(\delta) \operatorname{sen}(\alpha) + C \operatorname{sen}(\delta)$.

De estas cuatro series de ecuaciones se ve claramete que aquella que tendrá mayor razón de cambio en un pequeño lapso será la que corresponde a la rotación terrestre (ver ecuación (1)). Se pueden considerar despreciables los efectos del movimiento de traslación de la Tierra en torno al Sol y del movimiento solar en el lapso que se observa la fuente (se superponen tiempos de observación en decenas de minutos).

De esta forma, aunque en un primer momento se debe tener en cuenta todas las correcciones mencionadas anteriormente, la única con la que trabajaremos en este informe será la *corrección por rotación terrestre*, sin perder con esta suposición generalidad en los resultados obtenidos.

Entonces, todos estos ajustes recaen sobre la f_{ol} , de manera que el valor $f_{ol} \pm f_s$ sea siempre el mismo.

De no efectuar esta corrección en tiempo real, lo que se detectaría durante la observación sería un corrimiento de la línea en la banda de frecuencia intermedia respecto a la posición inicial en la frecuencia central. Debemos tener en cuenta que este defecto se observa en mayor medida en líneas muy finas, como líneas de máseres o algunas líneas moleculares. Suponiendo que la línea es monocromática, la Fig. 3 representa la situación planteada.

Como la observación se realiza en un rango temporal Δt , el resultado final luego de integrar la observación sin la aplicación de la corrección, será el ensanchamiento artificial de la línea espectral observada.

En las siguientes secciones analizaremos cada cuánto tiempo habrá que ajustar f_{OL} para tratar de minimizar el desfase en f_s debido a los problemas antes mencionados.

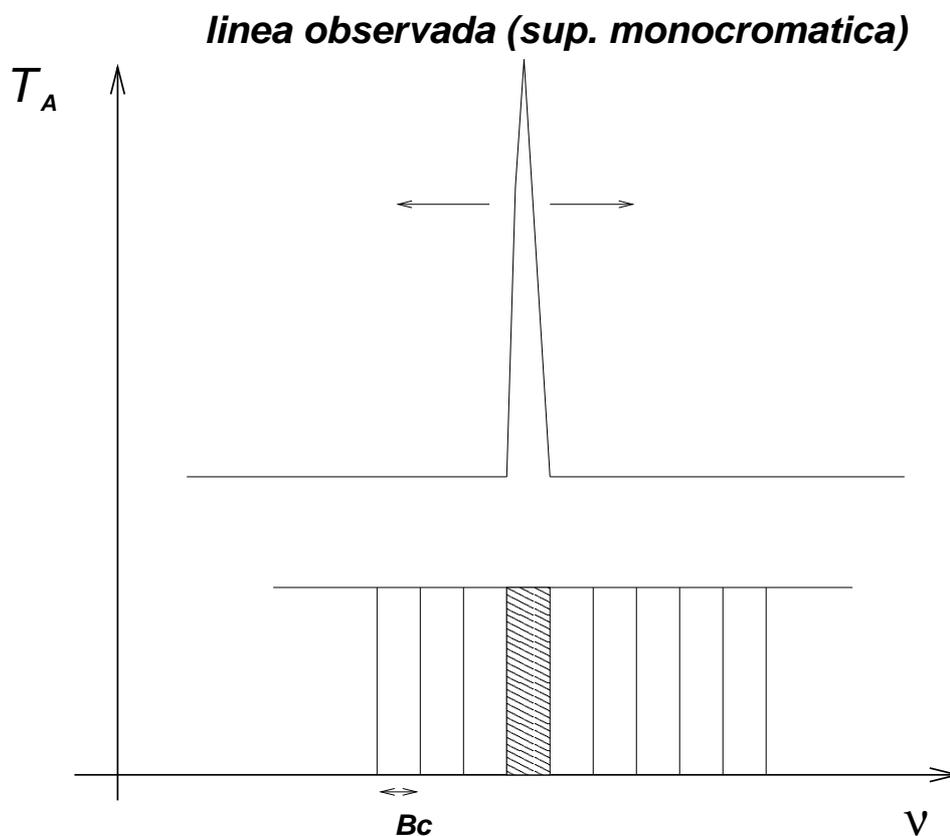


Figure 3: Esquema de la observación de una línea espectral, supuesta monocromática. Las flechas en sentido opuesto indican un posible corrimiento debido a efectos de rotación terrestre. La resolución en frecuencia de un canal es B_c .

3 Desarrollo matemático del problema

El objetivo fundamental de este trabajo es contar con un criterio teórico para decidir cada cuánto tiempo se debe aplicar una corrección a la f_{ol} a los efectos de evitar que la frecuencia observada de la línea espectral cambie con el tiempo. Su abordaje se encara determinando hasta cuándo se tiene en cuenta este corrimiento. Esquemáticamente, la situación se plantea como muestra la Fig. 4. Teniendo en cuenta la relación entre la potencia recibida P , y la temperatura de antena, T_A ², en el canal donde se detecta la línea espectral monocromática se detecta una potencia dada por

²Si pensamos a una antena como un resistor, es la temperatura necesaria para generar una potencia igual a la que se generaría en un telescopio cuando observa una fuente

$$P = kT_A B_c \quad (2)$$

donde k es la constante de Boltzman. Un corrimiento ΔB_c en frecuencia de la línea implica que en ese canal habrá una disminución de potencia ΔP dada por

$$\Delta P = kT_A \Delta B_c \quad (3)$$

Sabiendo que la temperatura de ruido *rms*, ΔT_{rms} cumple la siguiente relación,

$$\Delta T_{rms} = K \frac{T_{rec} + T_A}{\sqrt{B_c t}} \quad (4)$$

donde t es el tiempo de integración, T_{rec} la temperatura del receptor, B_c es el ancho de cada canal y $1 < K < 2$ es una contante que depende del modo de observacion (por ejemplo, potencia total convencional, con $K = \sqrt{2}$ o conmutación en frecuencia con superposición de banda, con $K = 2$).

Ahora podemos aplicar la definición (3) a la potencia del ruido *rms*, o sea,

$$\Delta P_{rms} = k B_c \Delta T_{rms} \quad (5)$$

Por lo tanto el criterio que se aplicará para decidir cada cuánto habrá que efectuar la corrección en frecuencia del OL será tal que la variación de la potencia sea una fracción n de la potencia del ruido ΔP_{rms}

$$\Delta P = \frac{1}{n} \Delta P_{rms} \quad (6)$$

donde $n = 1, 2, 3, \dots$. A partir de esta expresión, y teniendo en cuenta las relaciones (4) y (5), podemos despejar el ΔB_c , obteniendo

$$\Delta B_c = \frac{K}{n} \sqrt{\frac{B_c}{t}} \left(1 + \frac{T_{rec}}{T_A}\right) \quad (7)$$

Esta relación cuantifica la situación gráfica mostrada en la Fig. 4. Por otro lado, si derivamos la expresión (1) respecto al ψ y tomamos el incremento,

$$\Delta v_{rot} = -0.465 \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos[\psi(t)] \Delta(\psi) \quad (8)$$

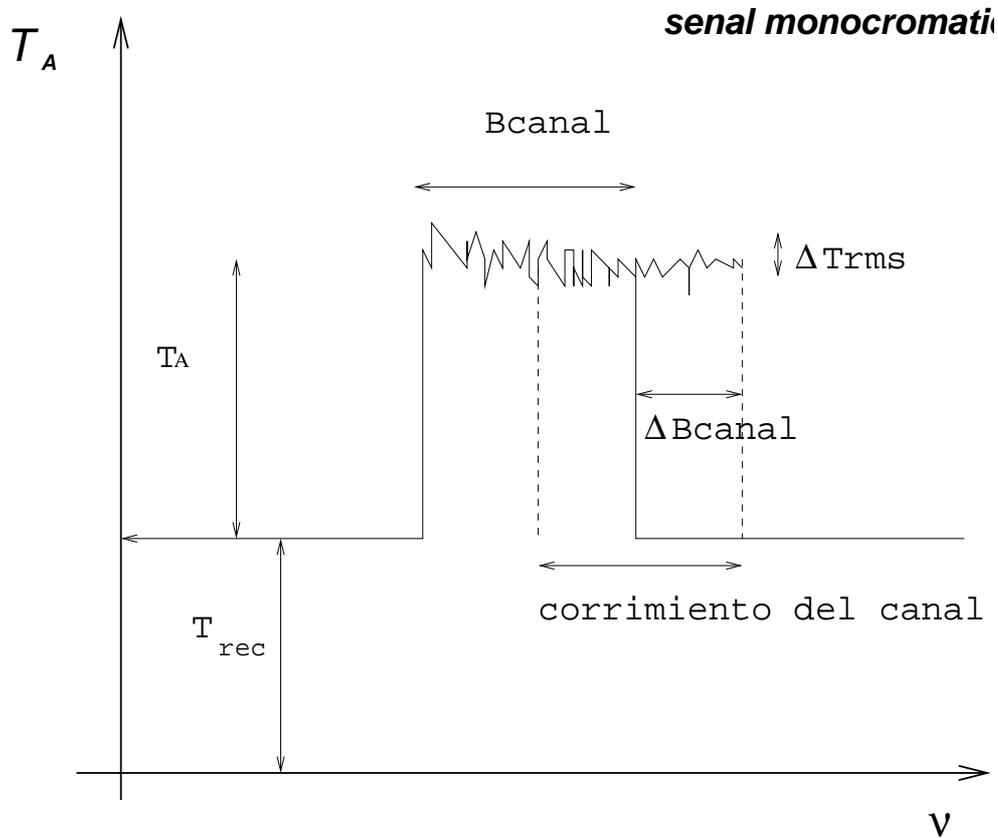


Figure 4: Gráfico esquemático en donde se denota un corrimiento en frecuencia de una “línea” con un ancho B_c . El ΔB_c y el ΔT_{rms} representan el corrimiento de la línea monocromática y la temperatura de ruido *rms*, respectivamente.

teniendo en cuenta que los incrementos en tiempo Δt , expresada en segundos de tiempo y el ángulo horario $\Delta\psi$, expresado en radianes, se encuentran relacionados por $\Delta\psi(rad) = 7.27 \times 10^{-5} \Delta t(seg)$, y que por efecto *Doppler* $\frac{\Delta v_{rot}}{c} = \frac{\Delta\nu}{\nu_0}$; en este caso $\Delta\nu = \Delta B_c$, y c expresada en $km\ s^{-1}$) la ecuación (8) se transforma en

$$\Delta B_c = \frac{\nu_0}{c} (3.38 \times 10^{-5}) \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\psi(t)) \Delta t \quad (9)$$

De la intersección de las curvas representadas por las ecuaciones (7) y (9) obtenemos gráficos como los mostrados en la Fig. 5.

En la misma la recta representa la gráfica de la ecuación (9), mientras que la curva representa la expresión (7). El valor de t_{max} es el *tiempo máximo de actualización*. Como

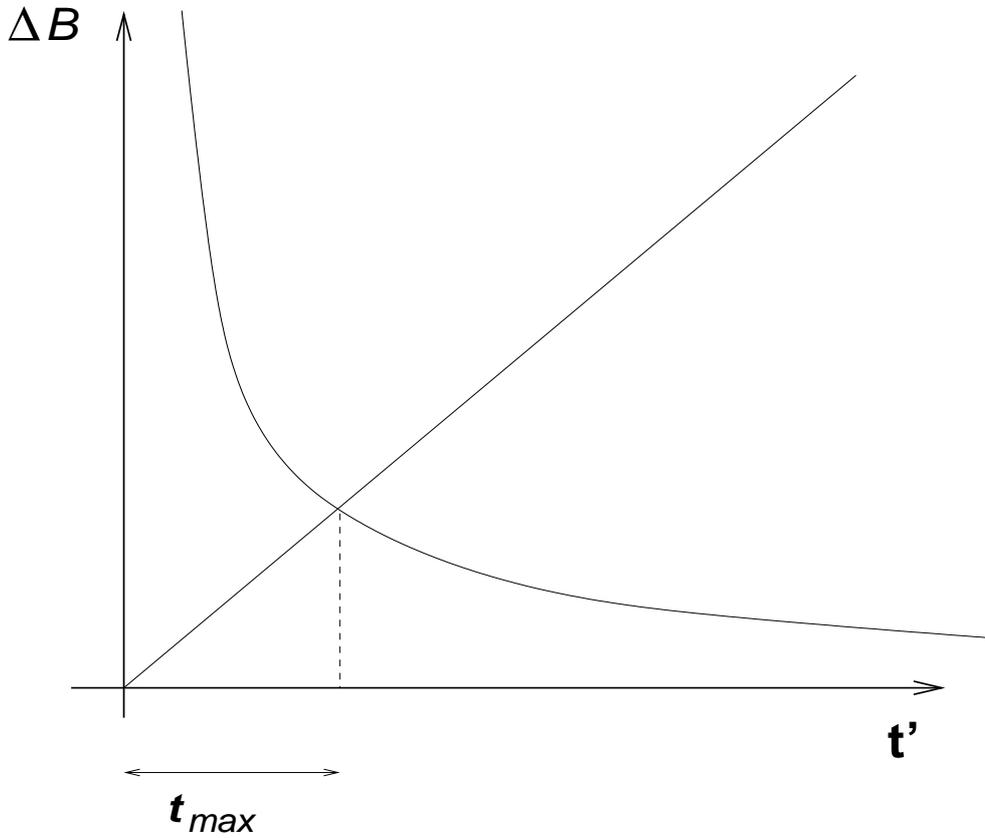


Figure 5: En este gráfico se representa la intersección de las dos curvas correspondientes a las expresiones (7) y (9). De la intersección de ambas curvas obtenemos el tiempo máximo de actualización, t_{max} .

máximo en t_{max} se deberá aplicar una corrección a la frecuencia del oscilador local para compensar los efectos de la rotación terrestre y evitar que la línea “viaje” en frecuencia.

Finalmente se puede encontrar que

$$t = C \left(\frac{1 + T_{rec}/T_A}{\cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\psi)} \right)^{2/3} \quad (10)$$

siendo $C = \left(\frac{Kc\sqrt{B_c}}{3.38 \times 10^{-5} n \nu_0} \right)^{2/3}$.

4 Análisis de las ecuaciones fundamentales

Como ya se mencionó anteriormente, el análisis de las ecuaciones 7 y 9, y su comparación nos permiten encarar el problema de la actualización en frecuencia del oscilador local.

Si observamos la ecuación (9) vemos que para un observador en una posición fija (para el caso de la Antena I del IAR, $\varphi = -34^\circ$), podemos aproximar esa expresión por

$$\frac{\Delta B_c}{\Delta t} \propto \nu_0 \cos(\delta) \cos(\psi) \quad (11)$$

de esta forma quedan como parámetros libres δ y ψ , y podemos agregar ν_0 como otro factor limitante en el ajuste. Teniendo en cuenta la Tabla 1 podemos ver que para $\delta = -9.1^\circ$, $\psi = 0^\circ$ (y para el caso particular de la Antena I del IAR, $\nu_0 = 4850$ MHz), el valor del miembro derecho de (11) será máximo.

Respecto a la ecuación (7), teniendo en cuenta que tenemos una función $\Delta B_c = \Delta B_c(t)$, los parámetros libres serán n , B_c y el cociente T_{rec}/T_A . A modo de ser lo más gráfico posible, vamos a analizar esta expresión adoptando $n = 3$, el número de canales del analizador $N_{can} = 1024$ y el ancho de banda total $\Delta B_{total} = 0.35$ MHz), o sea, $B_c = 0.34$ KHz. El rango de valores de T_{rec} varía entre 20 K para un receptor enfriado, hasta 60 K para uno a temperatura ambiente y T_A varía desde 0.1 K (líneas de recombinación) hasta 150 K (una fuente intensa en HI). De esta forma, vamos a tomar un valor de $T_{rec}/T_A = 20/150$, que será una cota máxima en el valor del cociente.

En la siguiente sección se muestran los resultados de distintos t_{max} para distintos valores de los parámetros mencionados.

5 Resultados: aplicación a la Antena I del IAR

Se realizó el estudio teórico del problema y se obtuvieron gráficos ΔB_c vs t , a partir del programa “*ol.for*” cuyo código fue elaborado en *Fortran 77*.

De este análisis, en la Tablas 2 y 3 se detallan los resultados correspondientes a las Fig. 6 y 7; obtenidos para el tiempo máximo de actualización t_{max} . Los parámetros libres son la frecuencia de observación, ν_0 , el ancho de banda B , y el valor de T_A para dos valores de T_{rec} , esencialmente 20 K (receptor enfriado criogénicamente), y 60 K. En la primer fila de cada tabla se detallan los parámetros fijos que se tuvieron en cuenta en cada análisis. La

elección de estos valores se hizo en base a que minimizan la componente de las ordenadas del punto de intersección entre las gráficas de las expresiones (7) y (9).

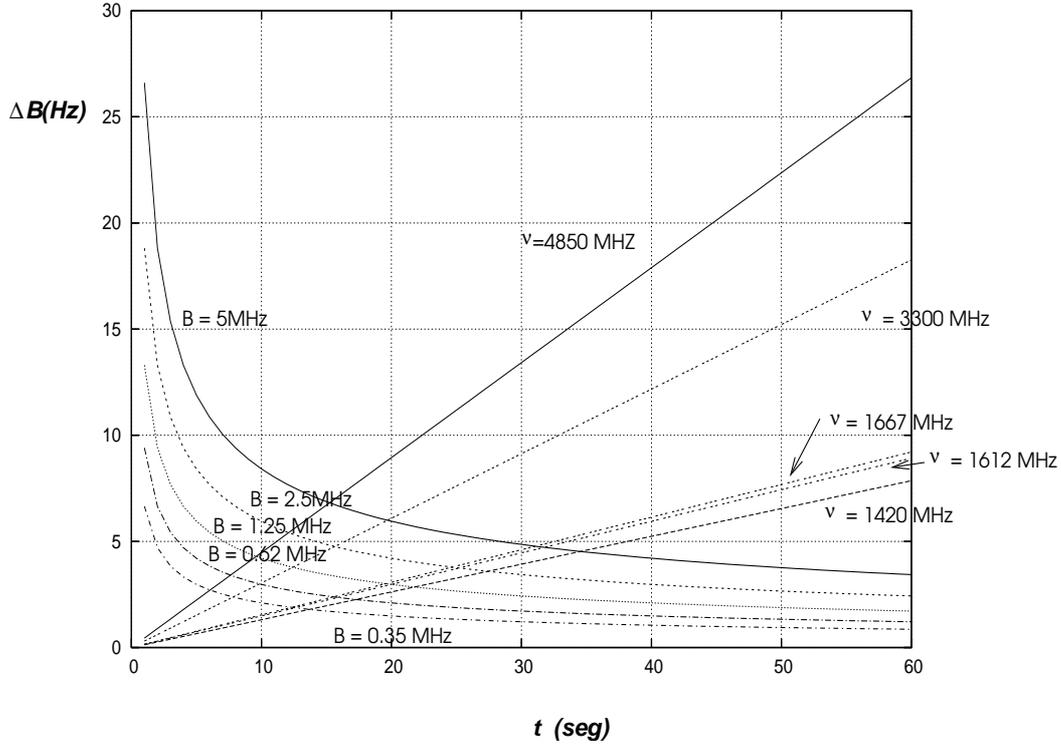


Figure 6: Gráfico ΔB vs t para $N_{can} = 1024$, $\delta = -9.1^\circ$ y $\tau(h) = 0$, $T_A = 150$ K y $T_{rec} = 20$ K, con una restricción $n = 3$. Valores de $\nu_0 = 1420, 1612, 1667, 1720, 3300$ y 4850 MHz (rectas) y de $\Delta B = 5, 2.5, 1.25, 0.62$ y 0.35 MHz (hipérbolas). Los valores de t_{max} figuran en la Tabla 2.

En la Figura 6 vemos que t_{max} disminuye al incrementarse la frecuencia de observación ν_0 . Una tendencia similar se observa al incrementarse la resolución en velocidad (disminuyendo B , pero manteniendo N_{can} constante). Para cada B el rango temporal entre la frecuencia mayor (4850 MHz) y la menor (1420 MHz) de observación va desde ~ 4 seg ($B = 0.35$ MHz) hasta ~ 6.5 seg ($B = 5$ MHz).

Table 2: t_{max} (seg) para diferentes anchos de banda B

ν_0 [MHz]	B [MHz]				
	5	2.5	1.25	0.62	0.35
1420	34.40	27.30	21.70	17.20	13.60
1612	31.60	25.10	19.90	15.80	12.50
1667	30.90	24.50	19.50	15.45	12.30
3300	19.57	15.52	12.32	9.78	7.77
4850	15.14	12.01	9.53	7.56	6.0

Parámetros: $B_{can} = 4.882 \times 10^3$, $T_{rec} = 20$ K, $T_A = 150$ K, $\delta = -9.1^\circ$, $t^h = 0$, $n=3$

6 Análisis de los datos

Según el criterio impuesto para el análisis del problema, el valor límite que adoptamos fue que el incremento en la potencia medida, ΔP ; fruto del corrimiento de los canales, no supere un tercio de la potencia medida del ruido rms , ΔP_{rms} .

En base a esto, obtuvimos un serie de gráficos cuyos parámetros han sido detallados en el capítulo anterior. El análisis de estos datos, enfocando la atención en el t_{max} , arroja lo siguiente:

- t_{max} aumenta al ir aumentando la frecuencia de observación ν_0 y el ancho de banda B . Para cada B el rango temporal entre la frecuencia mayor (4850 MHz) y la menor (1420 MHz) de observación va desde ~ 4 seg ($B = 0.35$ MHz) hasta ~ 35 seg ($B = 5$ MHz).
- disminuye al ir disminuyendo el ancho de banda total, o sea, al ir disminuyendo el ancho de banda de cada canal. Este rango de valores no excede los 20 seg.
- para el rango de observación de la Antena I ($-90^\circ \leq \delta \leq -9.1^\circ$), aumenta a medida que disminuye δ casi cinco veces del valor mínimo, o sea, ~ 6 segundos.
- se produce un gran aumento a medida que el cociente $\frac{T_{rec}}{T_A}$ aumenta. Esto nos puede determinar fuertemente qué tipo de fuente observar, conociendo *a priori* la temperatura del receptor (fundamentalmente la temperatura del primer amplificador). O sea, para

Table 3: τ_{max} para diferentes valores de frecuencia de observación ν_0 y temperatura de receptor de $T_{rec}= 20$ y 60 K.

T_{rec} [K]	B_c [Hz]		δ ($^\circ$)		t^h	n		
20	4.882×10^3		-9.8		0	3		
$\backslash T_A$ [K]	20	40	60	80	100	120	140	160
ν_0 [MHz] \backslash	τ_{max} [seg]							
1420	19.80	16.20	15.30	14.40	14.40	13.50	13.50	13.50
1612	18.00	15.30	13.509	13.50	13.50	12.609	12.60	12.59
1665	18.00	15.30	13.50	12.60	12.609	12.60	12.609	11.70
1720	17.10	14.40	13.509	12.60	12.60	12.60	11.70	11.70
3300	11.70	9.00	9.00	8.109	8.09	8.08	8.075	8.07
4850	9.00	7.20	6.90	6.30	6.29	6.28	6.275	6.26
7000	7.20	5.40	5.30	5.29	5.27	4.50	4.49	4.48
T_{rec} [K]								
60								
1420	31.50	23.40	19.80	18.00	17.10	16.20	16.2099	15.309
1612	28.80	21.60	18.00	17.109	16.20	15.30	14.409	14.40
1665	28.80	20.70	18.00	16.20	15.30	14.40	14.409	14.48
1720	27.90	20.709	20.709	16.209	15.309	14.409	14.409	13.50
33300	18.00	13.50	11.709	10.809	9.909	9.009	9.0099	9.0099
4850	14.409	9.909	9.009	8.109	7.209	7.209	7.20	7.209
7000	10.80	8.10	7.209	6.309	6.309	5.409	5.409	5.409

Los errores en los valores son del orden de ± 0.1 a 0.5 seg. a medida que la frecuencia es mayor.

un receptor enfriado no crogénicamente, lo tiempos de ajuste son un poco más relajados que para aquellos enfriados en forma crogénica.

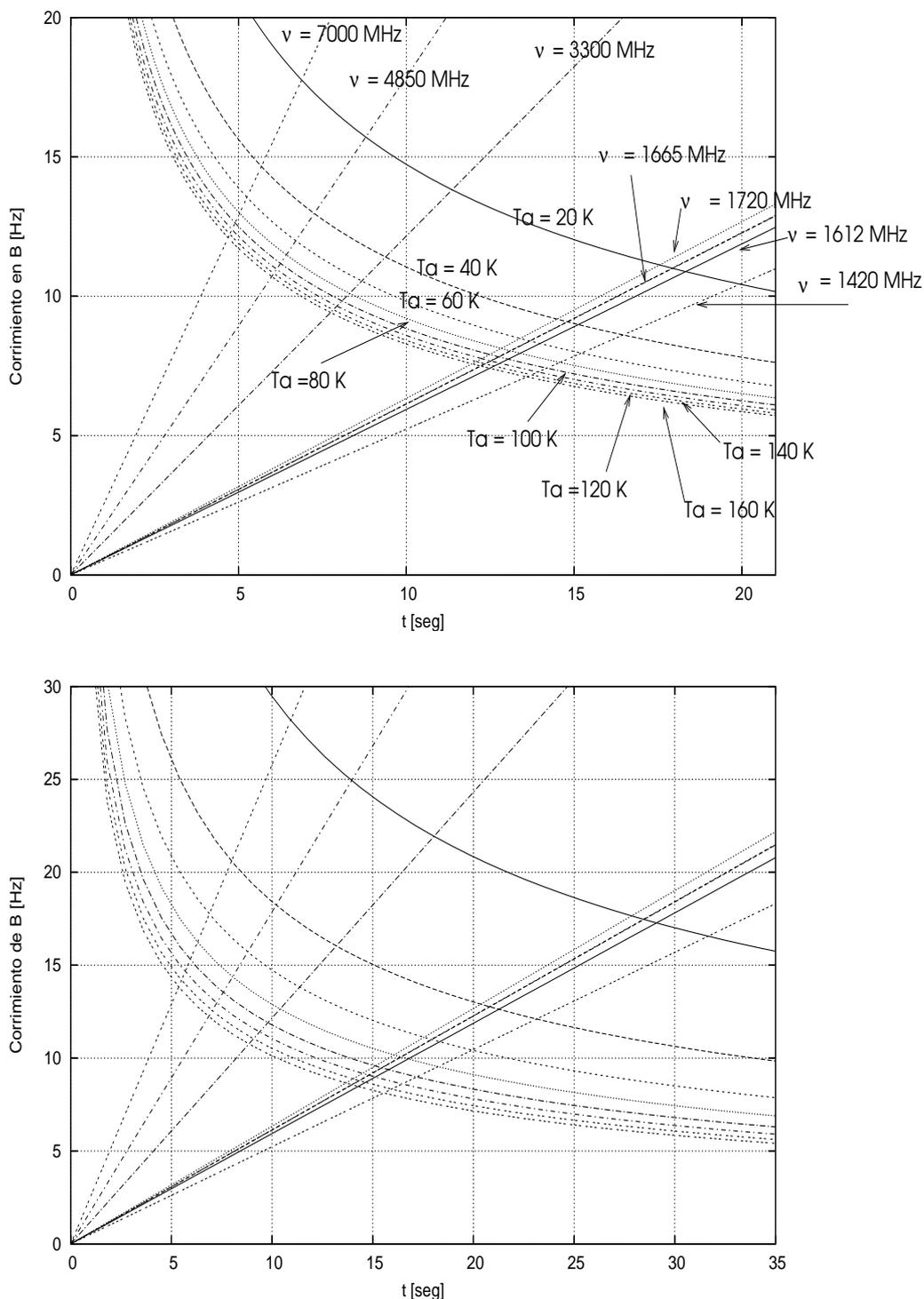


Figure 7: Gráficos ΔB vs τ para $N_{can} = 1024$, $B = 5$ MHz, $\delta = -9.1^\circ$ y $t^h = 0$, con una restricción $n = 3$, para $T_A = 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140$ y 160 K (hipérbolas), y valores de $\nu_0 = 1420, 1612, 1665, 1720, 3300, 4850$ y 7000 MHz (rectas). Las curvas son las mismas en ambos gráficos, pero sólo se marcaron en el panel superior. El panel superior corresponde a $T_{rec} = 20$ K y el inferior a $T_{rec} = 60$ K. Los valores de τ_{max} figuran en la Tabla 3.