ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACION

Departamento de Ingeniería Electrónica. Sistemas Electrónicos Analógicos, Quinto Curso.

Parcial 3 del 18 de Enero de 2011. **D.N.I.:**

APELLIDOS:

NOMBRE: SOLUCION

Problema 1. Tenemos un sensor formado por cuatro uniones tipo diodo, accesibles de forma independiente y que vamos a utilizar como sensores de una débil radiación infrarroja que incide sobre ellos uniformemente. Cada diodo iluminado será un fotogenerador que entregará una corriente de 25 pA sobre su resistencia dinámica r_d =4 kΩ, que es tan baja por la pequeña barrera de esa unión diodo. Por ello, se puede usar un solo diodo como sensor o varios de ellos conectados en serie (o en paralelo), con el fin de variar la relación Señal/Ruido S/N y de adaptar la resistencia de la fuente a la R_{opt} del amplificador. Aunque cada diodo tiene una capacidad C_f =25 pF en paralelo con su r_d , la baja constante de tiempo que resulta (τ = $C_f r_d$ =0.1 μs en nuestro caso) permite no considerar sus efectos limitadores en frecuencia porque la radiación infrarroja que hay que detectar está troceada en el tiempo a 64 Hz con un ciclo de trabajo del 50% (onda cuadrada con t_{op} = t_{off} =7.8 ms). **DATOS:** t_{op} =1.38×10⁻²³ W/Hz/K, t_{op} =300K, t_{op} =4 t_{op} =4 t_{op} =7.8 ms). **DATOS:** t_{op} =1.38×10⁻²³ W/Hz/K, t_{op} =300K, t_{op} =4 t_{op} =7.8 ms).

- 1- Explique a su manera qué efectos de C_j hemos despreciado en cuanto a ruido. Dibuje la forma de onda de la fotocorriente y del fotovoltaje sobre r_d utilizando un solo fotodiodo como fuente de señal. Suponiendo que el ancho de banda de nuestro amplificador va a estar limitado por un filtrado paso-bajo de primer orden que luego diseñaremos con frecuencia de corte f_c =64 Hz, calcule la relación S/N en este caso. (15 p)
- 2- Calcule la relación *S/N* para el caso de utilizar dos y cuatro fotodiodos conectados en serie como fuente de señal, suponiendo el mismo filtrado del Apartado 1 y que los fotovoltajes de señal debidos a fotocorrientes (Thèvenin-Norton) se suman directamente si están en serie. (**10 p**)
- 3- Por las bajas relaciones *S/N* que tenemos, la amplificación del *fotovoltaje* ac que pretendemos manejar debe cuidar los aspectos de diseño para bajo ruido. Dibuje el esquema de un amplificador de tensión de ganancia 10⁴ (80 dB) basado en Amplificador Operacional (AO) suponiendo que la fuente de señal que vamos a utilizar permite el paso de la corriente de polarización del AO si es necesario. Diseñe los valores de los elementos que use para obtener esa ganancia y ese ancho de banda <u>justificándolos</u>. (20 p)
 4- Empleando para el AO los equivalentes de ruido: e_n=4nV/Hz^{1/2} e i_n=0.5pA/ Hz^{1/2} obtenga la relación
- 4- Empleando para el AO los equivalentes de ruido: $\mathbf{e_n}$ =4nV/Hz^{1/2} e $\mathbf{i_n}$ =0.5pA/ Hz^{1/2} obtenga la relación señal/ruido a la salida (S/N)_o del amplificador que ha propuesto para los casos de: \mathbf{a}) un solo diodo, \mathbf{b}) dos diodos en serie y \mathbf{c}) cuatro diodos en serie como fuente de señal. ¿Por qué la combinación \mathbf{b}), que da una resistencia de fuente de señal igual a la R_{opt} del AO no es la que da una mejor (S/N)_o? (**20 p**)
- 5- Basándose en resultados del Apartado anterior comente a grandes rasgos qué podemos lograr si usamos las conexiones de diodos en paralelo. (**10 p**) Solo si no resolvió el Apartado anterior obtenga la relación (S/N)_o del amplificador que ha propuesto para los casos de: **a**) dos diodos en paralelo y **b**) cuatro diodos en paralelo como fuente de señal justificando sus cálculos.
- 6- Pudiendo usar el enfoque óptico para hacer que la radiación que incide sobre los cuatro fotodiodos incida sólo sobre dos de ellos o sobre uno sólo, razone qué tipo de fuente de señal y enfoque usaría para obtener la mejor relación S/N posible. (10 p)
- 7- Especifique el transformador que usaría (su relación de espiras **1:n**) para acoplar a su etapa el fotovoltaje generado por los cuatro diodos de forma que la figura de ruido fuese mínima. ¿Ve alguna relación entre **n** y el enfoque del Apartado anterior? (**15 p**)
- 8- No puntúa, sólo ayuda a decidir en caso de duda: Hemos despreciado efectos de la capacidad C_j =25 pF en paralelo con la r_d de cada diodo en cuanto a ruido eléctrico, ¿Significa esto que C_j es irrelevante para el ruido de la fuente? ¿Por qué? (cuatro o cinco líneas deberían ser suficientes para dar respuesta a esta pregunta avanzada sobre ruido eléctrico)



Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación Universidad Politécnica de Madrid



Asignatura		Fecha	
Apellidos		Curso	Calificación
Nombre	- SOLUCION -	Grupo	

1) Cada fotodiado iluminado tiene este circuito equivalente:

Hemos questo con linea de puntos

la capacidad G para indicar que "nos vamos a olvidar" de sus efectos

limitadores en frecuencia ($z = 0.1 \mu s \Rightarrow f_c \approx 1.6 \, \text{MHz}$) porque vannos a trabajar a fremencias del orden de decenas de Hz (fsw = 64 Hz). No mos

olvidamos por tanto de la existencia de G, necesaria para que exista

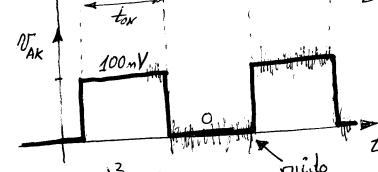
ruido visto como fluctuación de tensión entre los terminales Ayky que proviene de la fluctuación termodinámica de energía eléctrica

almacenada por campo electrico entre terminales Ay K.

La fotocorriente y el fotovoltaje entre les terminales Ay K será como se representa en la

Jigura, correspondiendo tor al fotodiodo iluminado y torral

mismo en oscuridad.



Petencia media de señal: $\langle P_i \rangle = \frac{(10^{-7})^2}{Vd} \cdot \frac{t_{ov}}{T} = S$

Potencia media de suido : < NO = N = 4KT Va. BWN

NH indica que la potencia instan timea de mido

4KT·(1ka·4)·64·1 $DATO: 4kT \cdot (4kx) \approx 16 \cdot 10^{-18} \text{ V/Hz}$ $S/N \approx \frac{0'5 \cdot 10^{-14}}{16 \cdot 10^{-18} \cdot 4 \cdot 100} = \frac{5 \cdot 10^{-15}}{6'4 \cdot 10^{-15}} = \frac{5}{6'4} = \frac{0'78}{6'4} \left(-1dB\right)$ Para conectar fotodiodos en serie, resulta mejor el equivalente Thèvenin que el Norton dibujado en el Apolo anterior. Por tanto: Por tanto, la comexión

4K. 2

4K. 2 Reserved de ruido doble en 8 ks que en 4 k

A'

Potencia de señal cuadruple (4 veces más

K'

que con un solo fotadiodo). Por tanto, la relación (S/N) pasa a ser: $S_N = \frac{45}{2N} = 2 \frac{5}{N} = 156$ o aumenta en 10 log 2 = 3 dB, pasando a ser: -1 dB +3 dB = 2 dB Con cuatro fotadiodos en serie (das grupos de dos fotadiodos en serie) habra una mejora de 2 respecto al caso auterior (o de 4 respecto a un solo fotodetector) por lo que la S/V (CUATRO = 2dB + 3dB = 5dB = 3/12 pero eso si, la resistencia del sensor así formado es 4x4kz=16kz

Reserve $R_1 = R_2 + R_4 > 1 \text{ K.s.}$ (print no forzer al A0 con execto de cargo)

Fivente $\{V_i \text{ (fotovoltaje)}\}$ $V_o = (1 + \frac{R_2}{R_1}) \cdot V_i + \text{ruido } V_{ox}$ Como hemos estudiado fiventes de 1, 2 o 4 fotabiodos en serie, ha

Como hemos estudiado fuentes de 1,2 o 4 fotadiodos en serie, la resistencia de fuente estará comprendida entre 4kr y 16 ksz.

Para bajo ruido interesa $R_N \approx R_{FUENTE} \Rightarrow (R_1//R_2) \ll 4K_{IZ}$ [1]

Por otra parte, una ganancia de 80dB (10 veces) en tensión requiere: $(1+\frac{R_2}{R_1})=10^4 \Rightarrow R_2 \approx 10^4 \cdot R_1 \Rightarrow R_1/R_2 \approx R_1$ [2]

Para cumplir [1] y [2] pademos elegir $R_1 = 152 \Rightarrow R_2 = 10 \text{ksz}$ Para tener f = 64 Hz, la reactancia de C a esta frecuencia ha

de ser igual a la resistencia R2. Por tanto:

 $\frac{1}{2\pi \cdot 64 \cdot C} = R_2 = \frac{1}{4 \cdot (\frac{\pi}{2} \cdot 64) \cdot C} = \frac{1}{4C \cdot BW_N} \Rightarrow C = \frac{1}{4R_2 \cdot 100 \text{ Hz}}$

Luego: $C = \frac{1}{4 \cdot 10^4 \cdot 10^2} = \frac{1}{4} \text{ MF} = 250 \text{ mF} \left(y \text{ que sijorte unos paros voltios} \right)$

4) La tensión anadrática de mido a la salida Von será agraximadamente:

 $V_{ON}^{2} = \left(1 + \frac{R_{2}}{R_{I}}\right)^{2} \cdot \left[e_{M}^{2} + \left(\tilde{l}_{M}R_{N}\right)^{2} + \frac{4\kappa T \cdot 1k_{R} \cdot \frac{R_{N}}{1k_{R}}}{1}\right] \cdot BW_{N}$

donde el término C de mido se ha escrito de forma comoda para

urar poco la calculadora aprovechando el DATO que se da. Como la RN del termino C es esencialmente la RFUENTE por el diseño realizado, la Figura de mido que es:

$$F = \frac{\text{Raido de la fuente} + \text{Raido añadido por la electrónica}}{\text{Raido de la fuente}} = 1 + \frac{A + B}{C}$$

nos va a permitir obtener las relaciones S/N que se piden a partir de las de cada fuente utilizada.

a) 1 solo jotodiodo:
$$(5/h)$$
: = 0/78 (-1dB)
$$\dot{F}_{1} = 1 + \frac{16 \cdot 10^{-18} + 4 \cdot 10^{-18}}{16 \cdot 10^{-18} \cdot \frac{R_{FVENTE} = 4KSL}{1KsL}} = 1 + \frac{16 \cdot 4}{16 \cdot 4} \times 8$$

$$F_1 = 1 + \frac{\alpha + \beta}{168} = 1 + \frac{20}{64} = \frac{84}{64} (1'18dB) \Rightarrow (\%) = (-1 - 1'18)dB$$

$$(\%)_0$$
 para 1 jotation es $-2/8dB$ o bien $0/78 \cdot \frac{64}{89} = 0'59$

En este caso
$$\beta$$
 pasa a ser 4β y δ pasa a ser 2δ . Tenemos:

$$F_{2} = 1 + \frac{16 + 16}{16 \cdot 8} = 1 + \frac{2}{8} = \frac{10}{8} = \frac{5}{4} = 1/25 (0/97dB)$$

(*) Esto significa que REVENTE = Ropt = Pu/in y que Fe es mínima.

Como (SM: era de 1'56 (2dB) > (Sh) estatiados es 103dB o bien:

$$(\frac{5}{N})_{0}$$
 2 diedos = $\frac{1}{56} \cdot \frac{4}{5} = \frac{1}{248}$

c) 4 fotatiates en serie:
$$(5/N)_i = 5dB(3/12)$$

En este caso B para a ser 16 B y 84 para a ser 48. Así pues:

$$F_4 = 1 + \frac{16 + 64}{16 \cdot 16} = 1 + \frac{5}{16} = \frac{21}{16} (1'18 dB)$$
 Similar a F_4

Como (S/N): era de 3'12 (5dB)
$$\Rightarrow$$
 (S/N) 4 fotados = 2'38 (3'8dB)

La combinación b) de 2 fotadiados no da la mejor (SN), porque su (SN): esta 3dB por debajo de la (SN): de 4 fotodiados.

Aunque la figura de suido $F_2 = 0'97dB$ es la mejor de todas, la figura de suido $F_4 = 1'18dB$ sólo es 0'2dB peor que F_2 , lo que no bista para los 3dB de mejora en (5/N) i conseguidos que no bista para los 3dB de mejora en (5/N) i conseguidos al parar de 2 fotodiodos en serie a cuatro fotodiodos en serie.

5) Usar conexiones de fotodiodos en paralelo produce mejoras similares en la (S/N): de la fuente, de modo que conectando 4 fotodiados en paralelo tenduamos una (S/N): de 5dB en una fuente de señal cuya R_{FUENTE} seña de sólo 1k52.

A 1ks 1ks × 04:100 nV

Esta R_{Fuente} esta 3 octavas por debajo (23=8) de Ropt del AO mientras que la R_{Fuente} de 4 dichos en sene estaba sólo una octava (un factor 2) por encima de Ropt. Con la misma (5/N) i es de esperar que obtengamos abora peor (5/N). Ello puede verse con la evolución de los factores B y 8 que hemos

venido utilizando. Así el factor p debenía caer en en un factor 4. Con ello tendríamos:

 $F_{\text{4 en probleho}} = 1 + \frac{16 + \frac{1}{4}}{16 \cdot 1} \approx 2 (3dB)$ que es mucho mayor que las que hemos venido manejando. De hecho la electrónica haría perder 3 de los 6dB de mejora en la (S/N):

obtenidos al conectar en paralelo los 4 fotodiados. Es decir: la conexión de 4 fotodiodos en paralelo actuardo como fuente de señal en el circuito del Apolo 3 duría una (S/N) = 5-3 = 2dB Las otres (S/N), para 2 diodos en paralelo seña:

 $F_{2 \text{ en parable}} = 1 + \frac{16 + 1}{16 \cdot 2} = \frac{49}{32} \left(\frac{185}{85} dB \right)$

Como la (S/N): de 2 fotodiodos en paralelo es igual a la de 2 fotodiodos en sevie (150 62 dB) tendiamos (5/No)=2-185 = 015dB en este caxo Notese que Rr signe siendo esencialmente la de la fuente incluso en el caso de 4 fotationes en paralelo $R_{FUENTE} = 1 k_{SZ} \approx R_N = R_{FUENTE} + 1 \Omega (R_1 11 R_2)$

6) Si enfocasemos la luz que incide sobre los enatro fotodiodos de modo que incidiese sobre sobre dos de ellos, éstos generarian el doble de señal cada uno: Tendríamos, para su conexión en Potencia de suido doble que la de un solo fotationo

4.100 mV

Potencia de señal 16

veces mayor que la de uno solo. serie, lo signiente:

(Ver Apdo 2 para comparas)

Si para un solo fotodiodo la (S/N): era 0'78 (-1dB), con la luz enfocada sobre dos fotodiodos usados como fuente de señal (los no iluminados no se conectan porque aternarian y esto es nefasto de cara al ruido) tendremos: $\binom{S/N}{i \ ENFOQUE 2} = 0.78 \cdot 8 = 6.24 \left(7.95 dB\right) \begin{cases} -1 dB + 10 log 8 = \\ -1 dB + 9 dB = 8 dB \end{cases}$ Con la figura de ruido Fz = 125 (097dB) que obtuvimos para esta fuente auja R_{FUENTE} = 8 Ks = Ropt, la (S/V) sería: (S/N) = 795dB-097dB ≈ 7dB Como esto ha mejorado en 6dB la (SN) de 2 fotadiados sin enfocar (lógico: el enfague duplica el fotovoltaje » cuadruplica la potencia S y 10 log(4) = 6 dB) vamos a seguir enfocando hasta enfocan Toda la luz que incidia sobre los 4 fotodiados para que lo haga sobre uno solo. Así tendremos:

Potencia de ruido igual a la de un solo fotodiado

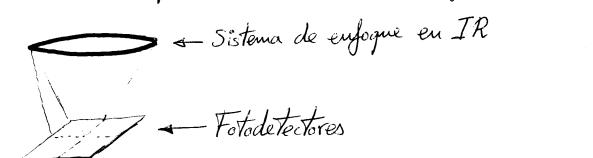
4. 100 nV Potencia de señal 16 veces mayor de la de un

Solo fotodiado iluminado sin enfocar.

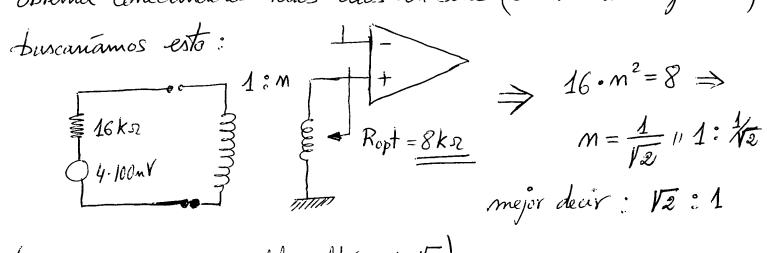
For tanto, la nueva $(5/N)_{i \in NFOQUE} 1 = 0.78 \cdot 16 = 12.48 (10.96 dB)$ Entonces, la nueva $(5/N)_{o \in NFOQUE} 1 = 16.96 - 1.18 = 9.78 dB (9.5 veces)$

que es mejor que la obtenida enfocando sobre 2 fotodicolos.

Por tanto, para abtener la mejor relación (SN) en estas difíciles condiciones maría un solo fotodiado enfocando sobre él la luz que incidía sobre los 4 fotodiados inicialmente.



7) Como la mejor (5/1): con los cuatro diodos iluminados se obtenía conectándolos todos ellos en serie (o todos ellos en paralelo)



(Con los 4 fotodicdos en paralelo saldría 1:18).

De esta forma la figura de ruido de la electrónica amplificadora paranía a ser $F_2 = 0.97dB$ en vez de $F_4 = 1.18dB$ y uno pensanía que paraníamos a tener una $(SN)_o = (SN)_i - 0.97dB = 5.097 = 4dB$ (la mejor obtenida sin enfocar). Por desgracia esto no es así, ya que el transformador no acopla o no transfiere las señales de fremencias muy bajas, como las de $f \to 0$ (DC). Por ello toda la potencia que tenía muestra señal en DC se pierde

en el transformador (y es el 50% de la potencia que 9) tema la señal. Pensemos en un transformador con M=1. das amplitudes de tensión a la entrada y salida de este transformador (superiendo que transfiere bien las señales de altas frecuencias como los armónicos del fundamental) son: Vi A BE AND BR La señal Vi sobre una R da una potencia instantanea $P_i(t)$ que T - 4/2es A_R^2 el 50% del tiempo $\Rightarrow \langle P_i(t) \rangle = \frac{A^2}{R} \cdot 0.5 = \frac{A^2}{2R}$ Por el contrario, la señal de salida del transformador, que mo tiene DC, da sobre R una potencia instantanea P(+) que es A_{4R}^{2} todo el tiempo \Rightarrow $\langle P_{0}(t) \rangle = \frac{A^{2}}{4R} \left(\frac{3}{4R} \right)^{2}$ menos que l'or tanto, con el transformador perderennos $\frac{3}{4R} = \frac{A^{2}}{4R} \left(\frac{3}{4R} \right)^{2}$ menos que la que entra) y para la conexión de 4 diodos tendremos :

Vista la Laja (S/N) que resulta con el transformador al perderse la mitad de potencia de señal y vista la buena (S/N), obtenida con el enfoyne, uno no diria que haya una relación entre el factor de enfoque del apartado anterior (4 a 1 o 2 a 1) y la relación M del transformador. Esto esa de esperar porque el transformador adapta la REVENTE a la ROPT de la electrónica sin cambiar la (5/N): de las señales a.C. que acopla. De hecho degrada la (S/N): de las señales que no acopla bien o que aternía (como la DC de la seval). El enjogne sobre un solo diodo si que mejora enormemente la (S/N):, mejora que la ligeramente per Figura de revido para REVENTE = 4KI = ROPT/2 con un fotodiado sin transformador, no logra eliminar o reducir drusticamente.

8) Aunque hayamos despreciado los efectos de filtrado de G sobre la señal que manejamos (desde De hasta unos cuantos armánicos de 64Hz para tener una señal bastante enadrada) Cj. no es irrelevante para el mido eléctrico de cada fotodiodo porque G es quien permite que tal ruido exista al permitir la existencia de energia eléctrica en el Sistema, cuyas fluctuaciones se observan como fluctuaciones de Tensión eléctrica entre terminales.

(Con Cj +0 el sistema no podría almacenar energía eléctrica y algo que no puede ser almacenado o exister en el sistema, dificilmente fluctuará en él por motivos térmicos por ejemplo)