

Detector de QRS basado en el algoritmo de Pan y Tompkins

Sergio Hinojosa

Resumen—En el siguiente trabajo se presenta una implementación y evaluación del algoritmo de detección de complejos QRS en señales de electrocardiografía basado en el algoritmo de Jiapu Pan y Willis J. Tompkins. Dicha implementación fué realizada en Python y se evaluó su performance utilizando la base de datos de arritmias del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) y el Hospital Beth-Israel (de aquí en adelante MIT-BIH) publicadas en el banco de señales Physionet.

Index Terms—Detector QRS, Pan y Tompkins, Python.

I. INTRODUCCIÓN

EL complejo QRS contiene importante información clínica, por ejemplo su frecuencia de aparición puede proporcionar información sobre la actividad del sistema nervioso autónomo. Si bien su relación señal ruido es mucho mayor que otras señales biológicas, su detección es afectada por artefactos debido a ruido muscular, movimiento de electrodos, interferencia de línea, corrimiento de la línea de base, y ondas T de alta frecuencia.

Dada la gran cantidad de estudios que requieren el delineado de la señal, y por lo tanto la localización de los complejos QRS, y las dificultades mencionadas asociadas a su detección, resulta esencial disponer de un algoritmo de detección robusto y confiable capaz de detectar tales marcas en condiciones de mucho ruido o de señal muy alterada por causas fisiológicas.

En este sentido, el algoritmo de detección de complejos QRS desarrollado por Jiapu Pan y Willis J. Tompkins ha alcanzado un gran reconocimiento en la comunidad científica por su alto valor predictivo.

II. MÉTODO

La figura II.1 muestra los pasos del proceso de análisis y en la figura II.2 se ve la evolución de un latido tipo que aparece en la figura II.2(a). Primero, se filtra la señal con un filtro pasabanda que permite obtener solo la banda donde se espera encontrar los complejos QRS y elimina otras señales que interfieren en la detección. Esto se realiza con un filtro pasa bajos que elimina todo el ruido de alta frecuencia (lo cual incluye por ejemplo, el ruido de 50Hz de la red de alimentación) y con un filtro pasa altos que como se ve, elimina las componentes de continua y las ondas P y T (figura II.2(b)). Luego, se deriva la señal filtrada para detectar las pendientes pronunciadas características de los complejos QRS. Hasta aquí el procesamiento es lineal, pero a continuación se realiza una medida de la energía instantánea de la derivada de la señal elevando al cuadrado muestra a muestra y promediando mediante una

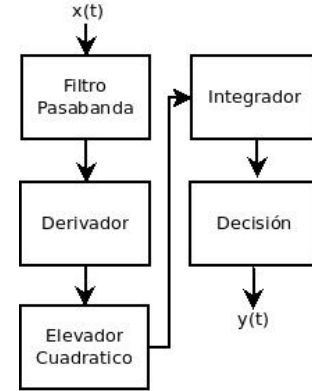


Figura II.1. Bloques del procesamiento

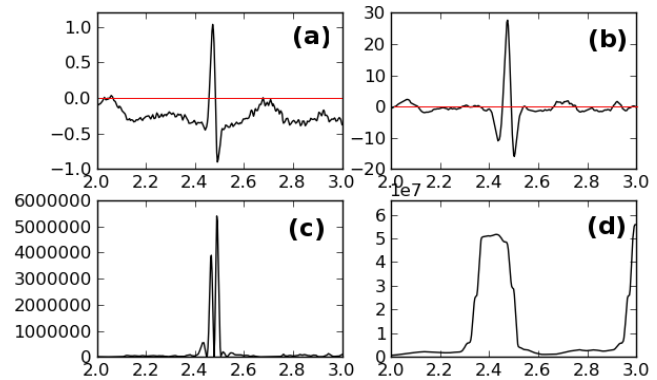


Figura II.2. Evolución de la señal

integral móvil ($E[x(t)] = \langle x^2 \rangle_{t-\tau}^t$). Esta medida de la energía permite: primero, que cuando la señal es elevada al cuadrado todas las muestras sean positivas y se acentúe la diferencia entre las distintas pendientes detectadas en la etapa de diferenciación (figura II.2(c)); segundo, cuando se promedia se eliminan las oscilaciones de poca duración que no pueden corresponder a un complejo QRS y se obtiene un pulso uniforme en la sección de señal correspondiente a un complejo QRS (figura II.2(d)).

A. Filtro Pasabanda y derivador

La función del filtro es reducir el ruido y la interferencia de señales fuera de la banda definida entre 5Hz y 15Hz. Esta banda se define a partir del análisis de las señales presentes en un ECG como se comentó en la introducción. La implementación del filtro pasabanda se realiza con un filtro pasa bajos y un filtro pasa altos en cascada. Cada uno es implementado con filtros recursivos.

Filtro Pasabajo

$$H(z) = \frac{(1 - z^{-6})^2}{(1 - z^{-1})^2} \quad (\text{II.1})$$

Filtro Pasalto

$$H(z) = \frac{-\frac{1}{32} + z^{-16} - z^{-17} + z^{-32}}{1 - z^{-1}} \quad (\text{II.2})$$

Derivador

$$H(z) = \frac{1}{8T}[-z^{-2} - 2z^{-1} + 2z^1 + z^2] \quad (\text{II.3})$$

B. Procesado de estos bloques

Con el fin de facilitar el procesamiento en tiempo real se optó por procesar estos tres bloques combinando sus respectivas respuestas impulsivas y obteniendo la ecuación en diferencias del conjunto:

$$H(z) = H(z)_{\text{pasabajo}} \cdot H(z)_{\text{pasalto}} \cdot H(z)_{\text{derivador}} \quad (\text{II.4})$$

$$H(z) = \frac{1}{8T} \left(\frac{-z^2}{32} - \frac{5z}{32} - \frac{5z^{-1}}{8} - \frac{7z^{-2}}{8} - \frac{9z^{-3}}{8} - \frac{21z^{-4}}{16} - \frac{21z^{-5}}{32} - \frac{9z^{-6}}{8} - \frac{7z^{-7}}{8} - \frac{5z^{-8}}{8} - \frac{3z^{-9}}{8} - \frac{5z^{-10}}{32} - \frac{16}{32} - \frac{z^{-11}}{32} + z^{-14} + 4z^{-15} + 7z^{-16} + 8z^{-17} + 8z^{-18} + 8z^{-19} + 6z^{-20} - 6z^{-22} - 8z^{-23} - 8z^{-24} - 8z^{-25} - 7z^{-26} - 4z^{-27} - z^{-28} + \frac{z^{-30}}{32} + \frac{5z^{-31}}{32} + \frac{3z^{-32}}{8} + \frac{5z^{-33}}{8} + \frac{7z^{-34}}{8} + \frac{9z^{-35}}{8} + \frac{21z^{-36}}{16} + \frac{21z^{-37}}{16} + \frac{9z^{-38}}{8} + \frac{7z^{-39}}{8} + \frac{5z^{-40}}{8} + \frac{3z^{-41}}{8} + \frac{5z^{-42}}{32} + \frac{z^{-43}}{32} - \frac{3}{8} \right) \quad (\text{II.5})$$

$$H(z)z^{-2} = \frac{1}{8T} \left(\frac{-1}{32} - \frac{5z^{-1}}{32} - \frac{5z^{-3}}{8} - \frac{7z^{-4}}{8} - \frac{9z^{-5}}{8} - \frac{21z^{-6}}{32} - \frac{21z^{-7}}{32} - \frac{9z^{-8}}{8} - \frac{7z^{-9}}{8} - \frac{5z^{-10}}{8} - \frac{16}{32} - \frac{16}{32} - \frac{8}{32} - \frac{8}{32} - \frac{8}{32} - \frac{3z^{-11}}{8} - \frac{5z^{-12}}{32} - \frac{z^{-13}}{32} + z^{-16} + 4z^{-17} + 7z^{-18} + 8z^{-19} + 8z^{-20} + 8z^{-21} + 6z^{-22} - 6z^{-24} - 8z^{-25} - 8z^{-26} - 8z^{-27} - 7z^{-28} - 4z^{-29} - z^{-30} + \frac{z^{-32}}{32} + \frac{5z^{-33}}{32} + \frac{3z^{-34}}{8} + \frac{5z^{-35}}{8} + \frac{7z^{-36}}{8} + \frac{9z^{-37}}{8} + \frac{21z^{-38}}{16} + \frac{21z^{-39}}{16} + \frac{9z^{-40}}{8} + \frac{7z^{-41}}{8} + \frac{5z^{-42}}{8} + \frac{16}{8} + \frac{3z^{-43}}{8} + \frac{5z^{-44}}{32} + \frac{z^{-45}}{32} - \frac{3z^{-2}}{8} \right) \quad (\text{II.6})$$

$$y(z)z^{-2} = x(z)H(z)z^{-2} \quad (\text{II.7})$$

$$y(n-2) = \frac{1}{8T} \left(\frac{-x(n)}{32} - \frac{5x(n-1)}{32} - \frac{5x(n-3)}{8} - \frac{7x(n-4)}{8} - \frac{9x(n-5)}{8} - \frac{21x(n-6)}{16} - \frac{21x(n-7)}{16} - \frac{9x(n-8)}{8} - \frac{7x(n-9)}{8} - \frac{5x(n-10)}{8} - \frac{3x(n-11)}{8} - \frac{5x(n-12)}{32} - \frac{x(n-13)}{32} + x(n-16) + 4x(n-17) + 7x(n-18) + 8x(n-19) + 8x(n-20) + 8x(n-21) + 6x(n-22) - 6x(n-24) - 8x(n-25) - 8x(n-26) - 8x(n-27) - 7x(n-28) - 4x(n-29) - x(n-30) + \frac{x(n-32)}{32} + \frac{5x(n-33)}{32} + \frac{3x(n-34)}{8} + \frac{5x(n-35)}{8} + \frac{7x(n-36)}{8} + \frac{9x(n-37)}{8} + \frac{21x(n-38)}{16} + \frac{21x(n-39)}{16} + \frac{9x(n-40)}{8} + \frac{7x(n-41)}{8} + \frac{5x(n-42)}{8} + \frac{3x(n-43)}{8} + \frac{5x(n-44)}{32} + \frac{x(n-45)}{32} - \frac{3x(n-2)}{8} \right) \quad (\text{II.8})$$

C. Elevación al cuadrado

En este bloque simplemente se eleva la señal al cuadrado punto a punto, lo cual genera una señal positiva intensificando aún más las altas frecuencias y atenuando las bajas, lo que ayuda a distanciar complejos QRS de ondas T de alta frecuencia.

D. Integración

La señal es integrada mediante una ventana móvil:

$$y(n) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x(n-i) \quad (\text{II.9})$$

Con la integral móvil se obtiene información sobre características adicionales a la pendiente de la onda R. En la misma, el ancho de la ventana (dado por N) debe ser aproximadamente igual al ancho de un complejo QRS, ya que si queda demasiado grande se mezclan con las ondas T, mientras que si queda demasiado chico un solo complejo QRS puede generar varios picos de energía. Este valor se ajusta experimentalmente, aunque se sabe que es del orden de los 150ms.

E. Detección

Se determina un pico de energía cuando al recibir las muestras de la señal integrada se detecta un cambio de pendiente de positivo a negativo y este se mantiene así por un numero prefijado de muestras. Luego el algoritmo de detección utilizando umbrales adaptativos (sec. E.1) determinará si este pico de energía corresponde efectivamente a un complejo QRS o si debe ser considerado ruido. También se incluyen en el algoritmo implementado técnicas de búsqueda hacia atrás (SearchBack, sec.E.2). La figura ?? muestra el algoritmo con un diagrama de flujo.

E.1 Umbrales

Durante el proceso de detección el detector lleva estimaciones del nivel de los picos de la señal asociados a los complejos QRS y del nivel de ruido de la misma, entendiéndose como ruido a cualquier pico de la señal que no sea un complejo QRS. Estos estimadores se actualizan cada vez que se halla un nuevo complejo QRS a través de un promedio ponderado entre el último valor medido y el valor tomado en la última detección:

$$SPKI = wpk * PEAKI + 0,875 * SPKI \quad (\text{II.10})$$

$$NPKI = wpk * PEAKI + 0,875 * NPKI \quad (\text{II.11})$$

siendo $SPKI$ y $NPKI$ los estimadores del nivel de los picos QRS y de ruido respectivamente, y $PEAKI$ el último pico detectado, sea de señal(QRS) o de ruido. wpk es para ajustar cuanto afecta la amplitud del último pico encontrado.

Estos valores se utilizan para computar dos umbrales:

$$TH1 = NPKI + wth * (SPKI - NPKI) \quad (\text{II.12})$$

$$TH2 = 0,5 * TH1 \quad (\text{II.13})$$

wth determina a que altura entre los dos niveles se fija el umbral. En la literatura se sugiere un valor de aproximadamente 0.25, pero las experiencias mostraron una mejor performance para $wth = 0.21$.

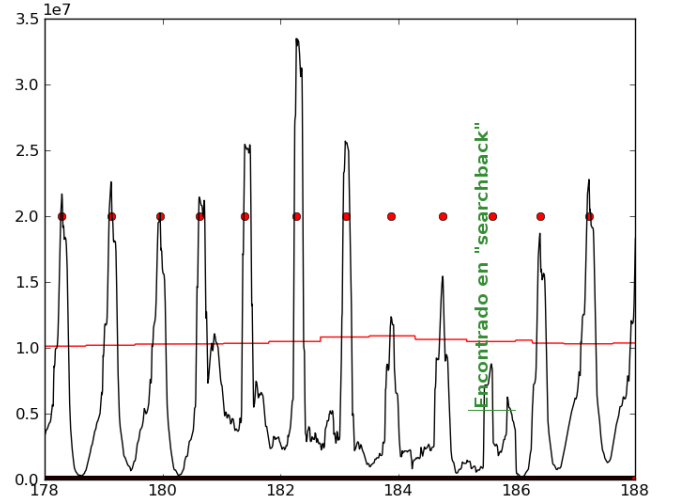


Figura II.3. Evolución de la señal

El primer umbral (TH1) es el que se utiliza para decidir si un pico dado es un complejo QRS o no y el segundo es utilizado cuando el algoritmo entra en modo searchback.

La figura II.3 muestra el funcionamiento de los umbrales adaptativos en una sección del registro 104 de la base de datos del MIT-BIH donde existe un nivel considerable de ruido. Allí también puede observarse un pico detectado en el modo searchback con el umbral marcado en la mitad de la altura del TH1.

E.2 Modo searchback

La técnica de Search-Back consiste en la búsqueda hacia atrás de un pico R, cuando no ha sido detectado durante un lapso de tiempo luego del pico R anterior.

Para implementar esta técnica se mantienen dos promedios del intervalo R-R. El primero ($RRAV_1$) es el promedio de los últimos 8 intervalos R-R, es decir

$$RRAV_1 = \frac{RR_n + \dots + RR_{n-7}}{8} \quad (\text{II.14})$$

El segundo ($RRAV_2$) es el promedio de los últimos 8 intervalos R-R "normales". Se le llama normales a los intervalos RR que caen dentro de los siguientes límites:

$$RR_{low} = 0,92RRAV_1$$

$$RR_{high} = 1,16RRAV_1$$

Entonces el Search-Back se aplica cuando no se detecta un pico R durante un lapso de tiempo dado por:

$$RR_{max} = 1,16 * RRAV_2 \quad (\text{II.15})$$

Una vez en estado SearchBack, se retrocede hasta el último pico encontrado. A partir de ese punto se comienza a buscar picos R disminuyendo el umbral a la mitad (usando TH2), y actualizando los umbrales usando un peso de $wpk = 0.25$. Si se recuerda que el peso del umbral normal era 0.125, el efecto de este cambio es darle más importancia a los picos nuevos. El algoritmo se detiene cuando

encuentra un pico R o cuando llega al punto donde entro en Search-Back en cuyo caso decide que no hubo ningún latido. Al finalizar el algoritmo, cualquiera sea el resultado, el umbral y la ponderación de picos nuevos vuelven a sus valores normales.

El período refractario tiene como objeto dejar en suspenso la detección durante un período de tiempo inmediatamente posterior a un complejo QRS donde no se espera que aparezca otro latido dada la frecuencia cardíaca que se viene registrando. Para ello el salto se calcula a partir del promedio de los últimos 8 intervalos RR:

$$salto = \frac{RRAV_1}{4} \quad (II.16)$$

III. RESULTADOS

esta implementación es capaz de funcionar “on-line” gracias a que ninguno de los algoritmos implicados necesita utilizar información en el futuro con respecto a la última muestra adquirida. El retardo entre la adquisición de la muestra correspondiente a un pico R y la detección y extracción del complejo QRS es inferior a medio segundo (del orden de algunas centenas de milisegundo).