# Circuitos Translineales Dinámicos: Estado del Arte en Técnicas de Análisis

L.A. Sarmiento Reyes, L. Hernández Martínez, Roberto Cruz Gordillo
INAOE, Departamento de Electrónica,
A.P. 72000 Puebla, Pue,
`email:` [jarocho, luish, rcruz]@inaoep.mx

## Abstract

Los circuitos translineales dinámicos y los circuitos de filtrado de dominio logarítmico constituyen una buena alternativa ante las crecientes limitaciones de la implementación analógica de circuitos tales como aspectos de rango dinámico, tendencia de fuentes de alimentación de bajo voltaje, menor consumo de potencia y demandas de alta frecuencia. En este trabajo se hace énfasis en los métodos para analizar circuitos translineales estáticos en general y dinámicos en particular.

## 1 Introducción

Debido a la tendencia en el uso de bajos voltajes de alimentación y baja potencia de operación, el área de filtros integrados analógicos esta enfrentándose a serios desafíos. El máximo rango dinámico alcanzado usando técnicas de implementación de filtros convencional, similares a los casos en que se utilizan amplificadores operacionales, en técnicas MOSFET-C, transconductancias-C y capacitores conmutados, está seriamente restringido por las fuentes de alimentación.

En un contexto general, los filtros translineales forman una subclase que abarca los tipos de redes companion que presentan teóricamente a una función de transferencia dependiente de una frecuencia lineal. También se les conoce como redes de filtrado logarítmico dado que sus ecuaciones de funcionamiento están basadas en la relación logarítmica entre los voltajes y corrientes, lo cual es una propiedad natural de la tecnología bipolar. Las aplicaciones circuitales del principio de diseño de funciones dinámicas no lineales son osciladores, convertidores RMS-DC, mezcladores y PLLs.

## 2 Principio Translineal

Los circuitos translineales pueden ser divididos en dos grupos principales: translineal estático y translineal dinámico.

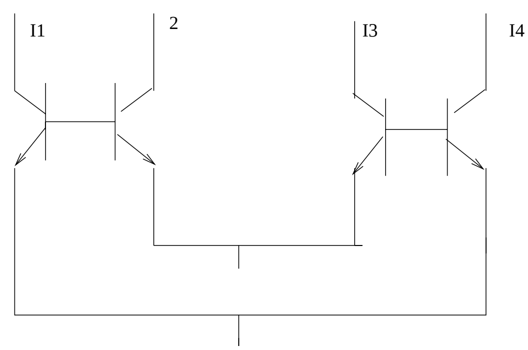


Figure 1: Lazo translineal

### 2.1 Principio translineal estático

Los circuitos translineales estáticos realizan funciones de transferencia estáticas, ambas lineales o no lineales. Los circuitos translineales están basados en una relación exponencial entre voltaje y corriente, característico para los transistores bipolares y el transistor MOS en la región de inversión débil. La corriente de colector de un transistor bipolar en la región activa esta dado por:

$$I_c = I_s e^{V_{be}}/V_T \qquad (1)$$

El principio translineal se aplica en los lazos formados por uniones de semiconductores. Un lazo translineal está caracterizado por un número de uniones, donde él número de dispositivos en el sentido de las manecillas del reloj (CW, del Inglés *clockwise*) es igual al número de dispositivos en el sentido contrario a las manecillas del reloj (CCW, del Inglés *counter-clockwise*). Un ejemplo con cuatro transistores se muestra en la figura 1, se supone que los transistores están polarizados de alguna manera y las corrientes de polarización son las corrientes de colector de $I_1 - -I_4$. Cuando todos los dispositivos operan a la misma temperatura,esto permite obtener una representación de la ecuación translineal de lazos en términos de producto de corrientes:

$$I_1 I_3 = I_2 I_4 \tag{2}$$

La ecuación de lazo translineal resulta básica para una amplia variedad de funciones electrónicas estáticas, las cuales son independientes del proceso y la temperatura. En general para un lazo de $n$ uniones se tiene:

$$\prod I_{CW} = \prod I_{CCW} \tag{3}$$

## 2.2 Principio translineal dinámico

El principio translineal estático, como su nombre lo indica supone una nuna dependencia respecto al tiempo de todas las variables involucradas, por lo que no es posible generar funciones en las que el comportamiento dinámico sea el más importante.

Los circuitos translineales dinámicos realizan funciones de transferencia en las que la dependencia en el tiempo (y por ende en la frecuencia) se halla presente. La introducción de capacitancias como elementos básicos de las redes translineales, incrementa significativamente las aplicaciones de estos circuitos, como consecuencia de representar al sistema por medio de ecuaciones diferenciales. Cuando la ecuación diferencial resultante es lineal, el sistema modelado puede ser cualquier sistema lineal representado por estados, e.g. filtros lineales. Cuando la ecuación diferencial resultante es no lineal, el sistema puede representar a osciladores o PLLs.

El principio translineal dinámico puede ser explicado con referencia al subcircuito mostrado en la figura 2. En términos de la corriente de colector $I_c$ y la corriente que circula por el capacitor C ($I_{cap}$), una expresión para $I_{cap}$ puede deducirse a partir de la derivada de la corriente de la union BE del transistor, es decir:

$$I_{cap} = CV_T \frac{\dot{I}_c}{I_c} \tag{4}$$

donde $\dot{I}_c$ representa la derivada con respecto al tiempo de la corriente de colector. Una mejor comprensión de el principio translineal puede ser obtenida mediante un pequeño despeje en la ecuación 4:

$$CV_T \dot{I}_c = I_{cap} I_c \tag{5}$$

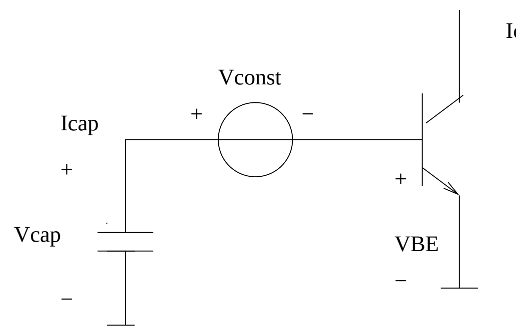


Figure 2: Princio translineal dinámico

Esta ecuación representa emblemáticamente el principio translineal dinámico:

> *Una derivada con respecto al tiempo de una corriente puede ser mapeada sobre un producto de corrientes*

.

Puede observarse que en este punto, el principio translineal estático convencional, aparece presente en el producto de corrientes en el lado derecho de la ecuación. Así la implementación de ecuaciones diferenciales llega a ser equivalente a la implementación de un producto de corrientes.

# 3 Métodos de Análisis de Circuitos Translineales

A continuación de desglosan brevemente algunos métodos de análisis de circuitos translineales.

## 3.1 Análisis translineal global

Este método de modo corriente está basado en una aproximación translineal. Dado que la diferencia básica entre los circuitos translineal estático y dinámico, es la presencia de capacitores, por ello, el cálculo de las corrientes de los capacitores forma la clave para el análisis de los circuitos translineales dinámicos.

El primer paso es expresar todas las corrientes de colector en términos de las corrientes de fuente, las cuales son conectadas a los nodos del núcleo translineal. Las corrientes de colector son combinaciones lineales de la entrada, la polarización de DC, la corriente de salida, y algunas corrientes intermedias en el caso de circuitos multiplicadores. Una vez que las corrientes de colector son encontradas, las ecuaciones de lazos translineales se determinan a partir de la ecuación 2. El último paso del análisis es resolver el sistema de ecuaciones de lazos translineales para las corrientes de salida por eliminación de las corrientes intermedias.

En un circuito translineal dinámico, algunos capacitores, están conectados a los nodos de el núcleo translineal, como consecuencia, las corrientes de nodo son determinadas también por las corrientes que fluyen a través de estos capacitores, por lo tanto, las corrientes de los capacitores aparecen en las ecuaciones del lazo translineal. Desde este punto de vista, los capacitores pueden ser considerados como un tipo especial de fuentes de corriente. Para resolver el sistema de ecuaciones de lazo, las corrientes de los capacitores tienen que ser eliminadas.

Por último, para hallar las expresiones para las corrientes de los capacitores, una capacitancia conectada a un núcleo translineal siempre forma un lazo con una o más uniones base-emisor en serie (figura 3). El voltaje del capacitor $V_{cap}$ puede expresarse en términos de la corriente de colector que fluye a través del transistor. La corriente en la capacitancia $I_{cap}$ puede ahora ser calculada através de la derivada de $V_{cap}$ con respecto al tiempo, de manera que es posible obtener una ecuación de modo corriente:

$$I_{cap} = CV_T \sum \pm \frac{\dot{I}_{c,i}}{I_{c,i}} \tag{6}$$

donde el signo $\pm$ de cada término depende de la orientación del transistor correspondiente.

Para analizar un circuito translineal dinámico, la ecuación 6 tiene que ser aplicada a cada capacitor en el circuito para encontrar una expresión para la corriente que fluye a su través. Finalmente, por eliminación de las corrientes intermedias se llega a una relación directa de las ecuaciones diferenciales descritas por la corriente de salida.

### 3.2 Análisis basado en ecuaciones diferenciales de Bernoulli

Un método de análisis modo corriente alternativo ha sido propuesto en [1]. Este método puede ser usado para analizar filtros en el dominio logarítmico basados en la estructura genérica mostrada en la

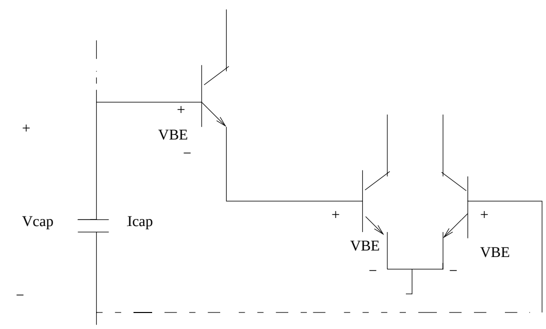


Figure 3: Capacitor en lazo translineal

figura 4. Es decir, varias de estas celdas básicas se interconectan para modelar una ecuación diferencial general.

En la celda básica de Bernoulli, las corrientes $I_{uk}$ — donde k[1,..., n], $n$ denota el orden del filtro — determinan los estados (derivadas) de la función de transferencia. Las corrientes $I_{ok}$ son corrientes de polarizacin de DC. La celda de Bernoulli está descrita por una ecuación diferencial de primer orden:

$$C_k U_T \frac{d}{dt} \ln\, c_k I_{in} T_1 \ldots . T_k = \frac{1}{T_k} \tag{7}$$

donde $I_{in}$ es la corriente de entrada, $c_k$ es una constante con dimensión $[A^{k-1}]$, $C_k$ es la capacitancia y $1/T_k$ una corriente de colector, como se muestra en la figura 4. Usando la definición de $I_{wk} = c_k I_{in} T_1 \ldots\ldots T_k$, donde $c_k$ es una constante con dimensiones $[A^k]$, y sustituyendo en la ecuación 7 produce:

$$C_k U_T \dot{I}_k + I_{uk} I_{wk} = \frac{C_k}{C_{k-1}} I_{wk-1} \tag{8}$$

por definición $I_{w_o}$ es igual a $I_{in}$.

Para analizar un filtro de dominio logarítmico, primero, las corrientes $I_{uk}$ deben ser determinadas usando técnicas de análisis translineal estático, después aplicar la ecuación 8 a todas las celdas de Bernoulli nos lleva a un conjunto de $n$ ecuaciones diferenciales de primer orden, que expresa una descripción del espacio de estados del circuito translineal dinámico en cuestión.

### 3.3 Análisis Translineal de Espacio de Estados

La descripción de espacio de estados puede ser usada para descomponer una ecuación diferencial de $n$ orden en un sistema de $n$ ecuaciones de primer

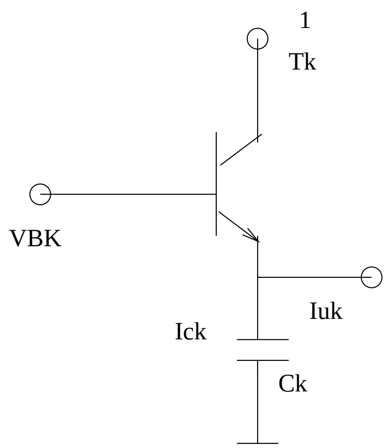


Figure 4: Celda de Bernoulli

orden. Lo que en teoría de ecuaciones diferenciales se conoce como *proceso de linearización*.

En este caso, la aproximación de espacio de estados puede ser aplicada convenientemente para el propósito de análisis. Usando el método de análisis translineal de espacio de estados, las ecuaciones de análisis son obtenidas rápidamente. En general es necesario emplear variables de estado para encontrar la descripción de espacios de estado. Para filtros translineales, los voltajes de los capacitores son variables de estado inconvenientes. En cambio, el modo corriente representa una mejor selección al usar las corrientes obtenidas de una relación exponencial V-I de los voltajes del capacitor, aplicando simplemente la ley exponencial de los transistores bipolares.

## 4 Conclusiones

Los circuitos translineales diámicos constituyen una nueva aproximación para la integración en el procesamiento de funciones de señales analogicas. Estos circuitos proveen una mejor opción para hacer frente a las limitaciones de rango dinámico, a las demandas de baja potencia y bajo voltaje. Se han presentado los métodos más comúnmente utilizados para llevar a cabo el análisis de circuitos translineales en la actualidad.

## References

[1] E.M.Drakakis, A.J.Payne, and C Toumazou,"Bernoulli operator: A low-level approach to log-domain signal processing." Electronic Letters 33(12),pp 1008-1009,1997

[2] R.W.Adams, Filtering in the log domain. 63rd Convention A.E.S.,LA, preprint 1470,1979

[3] E.Seevinck,"Companding current-mode integrator: A new circuit principle for continuous-time monolithic filters" Electronic Letters 26(24),pp.2046-2047,1990