

## 以電流式主動元件設計之波型產生器

侯俊禮\* 莊肇富

私立中原大學電子工程學系

### 摘要

本論文主要是應用現成的第二代電流傳輸器(Second-Generation Current Conveyor II ; CCII) 做成的積分器(Integrator) 電路和第二代電流控制傳輸器(Second-Generation Current Controlled Conveyor ; CCCII)做成的開關(Switch) 電路，而提出兩個不同的應用；(1)三角波產生器(Triangle-wave Generator)，(2)階梯波產生器(Staircase-wave Generator)，這兩者電路的好處就是比用運算放大器(Operational Amplifier ; OP)所做的類似功能電路速率快，並在最後我們從模擬結果證明本論文所提之電路可行性。

**關鍵詞：**電流傳輸器、積分器、開關、三角波產生器、階梯波產生器

## The Design of Waveform Generators Using Current-Mode Active Components

Chun-Li Hou Chao-Fu Chuang

Department of Electronic Engineering, Chung Yuan Christian University

### Abstract

In this thesis, the object of this study proposed two applications of an integrator using a second-generation current conveyer II and a switch using a second-generation current controlled conveyer II : (1)Triangle-wave generator, (2) Staircase-wave generator, both of them have higher speed than those using an operational amplifier.

In the end, simulation results are given to demonstrate the feasibility of the proposed circuits.

**Keywords :** Current Conveyer, Integrator, Switch, Triangle-wave Generator, Staircase-wave Generator

### 一、序論

一般類比電路大多是以電壓方式(voltage mode)來處理信號，而電壓式運算放大器(Operational Amplifier ; OP Amp.)因為價格低廉且技術穩定，使得電壓式運算放大器被一般電路設計者廣泛使用，但是電壓式電路受限於增益頻寬積(GBP)為定值且回轉率(slew rate)不夠高，使得電路設計者在處理高頻訊號時受到了許多限制。

而近年來電流式(current mode)電路受到許多電路設計者的矚目，是因為電流式電路具有較大的線性範圍、較佳的動態範圍以及電路結構較簡單等等，而成為各界學者專家研究之對象。

---

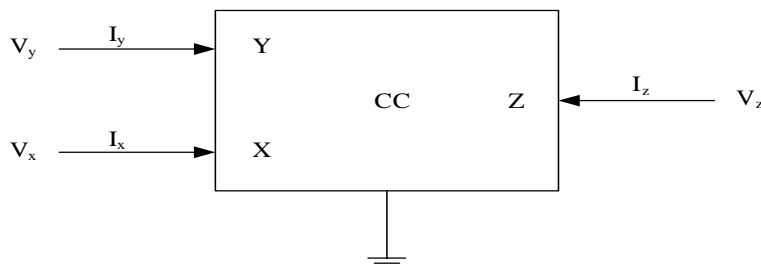
\* 電子工程系副教授 地址：中壢市中北路 200 號 Tel : 03-2659999 E-mail : clhou@cycu.edu.tw

目前通用的電流式主動元件有下列幾種:運算轉導放大器(Operational Transconductance Amplifier ; OTA)、電流傳輸器(Current Conveyor ; CC)、電流回授放大電路(Current Feedback Amplifier ; CFA)等等。

傳統電路上使用電壓式運算放大器串接電容器做反相積分器(Integrator)電路，本篇論文主要是應用現已有的第二代電流傳輸器做的積分器，此積分器電路設計上使用一個接地電容器，其作法能夠使其更利於積體電路化，且應用第二代電流控制傳輸器設計一個開關電路(Switch)，最後內容以主題應用方式設計出三角波產生器(Triangle-wave Generator)，並以此延伸做出階梯波產生器(Staircase-wave Generator)，並對論文中所提之電路做了 SPICE 模擬，讓理論與分析相符合。

## 二、電流式主動元件電流傳輸器簡介

電流傳輸器(Current Conveyor) [1]，是一個三埠的電流模式元件如圖(一)，其中 X 端和 Y 端為輸入端，Z 端為高阻抗的電流輸出端。與電壓式運算放大器相比較，以電流傳輸器為主動元件設計電流模式處理 (current mode approach)的電路，一般都具有較大的頻寬、及較高的精確度。



圖一 電流傳輸器方塊圖

電流傳輸器一般都能滿足(2-1)所定義之矩陣、 $V_x = V_y$  代表 X 端和 Y 端式電壓追隨的關係； $I_z = \pm I_x$  表示 X 端電流傳輸至 Z 端的關係，正負符號控制 Z 端電流方向、及區分正型或負型的電流傳輸器； $\alpha$  值一般等於零或是 $\pm 1$ ，代表 Y 端電流與 X 端電流的比例關係，分別定義不同性質之電流傳輸器。

電流特性矩陣方程式：

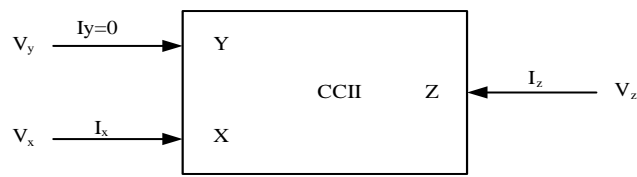
$$\begin{bmatrix} I_y \\ V_x \\ I_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \alpha & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & \pm 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_y \\ I_x \\ V_z \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

第二代電流傳輸器(Second-Generation Current Conveyor; CCII)[2]於 1970 年由 K. C. Smith 和 A. Sedra 所提出，圖(二)為 CCII 的元件符號，其主要是讓電流傳輸器能夠呈現更多變化的設計。CCII 其電路特性矩陣方程式如下(2-2)：

$$\begin{bmatrix} I_y \\ V_x \\ I_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & \pm 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_y \\ I_x \\ V_z \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

其 $\pm$ 號表示第二代正型電流傳輸器(CCII+)與第二代負型電流傳輸器(CCII-)，將方程式展開如式(2-3)：

$$I_y = 0, V_x = V_y, I_z = \pm I_x \quad (2-3)$$



圖二 第二代電路傳輸器方塊圖

第二代電流控制傳輸器(Second-Generation Current Controlled Conveyor ; CCCII)[3]於 1995 年由 Fabre 等幾位學者提出，圖(三)為 CCCII 的元件符號，其主要是利用 CCII 之 X 端的寄生電阻加以推導出來，CCCII 其電路特性矩陣方程式如下(2-4)：

$$\begin{bmatrix} I_y \\ V_x \\ I_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & R_x & 0 \\ 0 & \pm 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_y \\ I_x \\ V_z \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

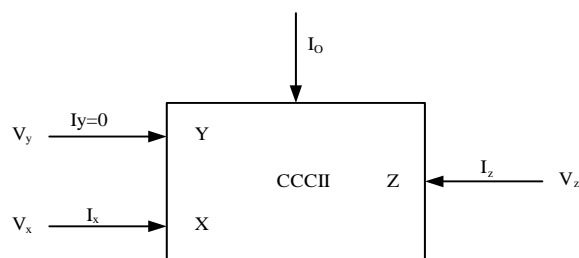
其±號表示第二代正型電流控制傳輸器(CCCII+)與第二代負型電流控制傳輸器(CCCII-)，將方程式展開如式(2-5)：

$$I_y = 0, V_x = V_y + R_x I_x, I_z = \pm I_x \quad (2-5)$$

而矩陣中的  $R_x$  可由偏壓電流來控制的 X 端寄生電阻，其關係可表示如下(2-6)：

$$R_x = \frac{V_x - V_y}{I_x} = \frac{V_T}{2I_O} \quad (2-6)$$

其中上式中  $V_T$  是熱電壓，而  $I_O$  是 CCCII 的偏壓電流。



圖三 第二代電流控制傳輸器方塊圖

### 三、電壓式積分器電路與電流式開關電路合成

爲了驗證本論文所提之電路正確性與可行性，因此兩者應用電路中主動元件中的 CCII+採用台大劉深淵教授所提之 CMOS 元件 CCII+電路[4]，圖(四)，而 CCCII-採用 2001 年 IEEE 由 Ali Toker, Ece O. G. and Serder Ö.三位所提出之 CMOS 電路[5]，圖(五)，MOS 元件使用 TSMC .35um SPICE MODEL 作爲模擬。



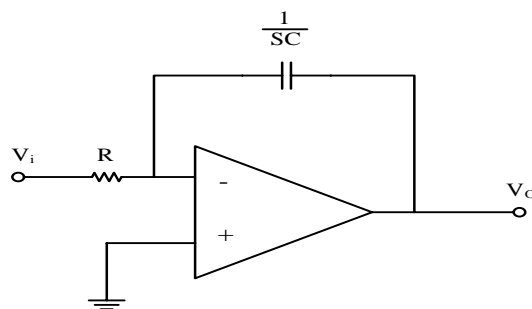


### 3-1. 電壓式積分器電路

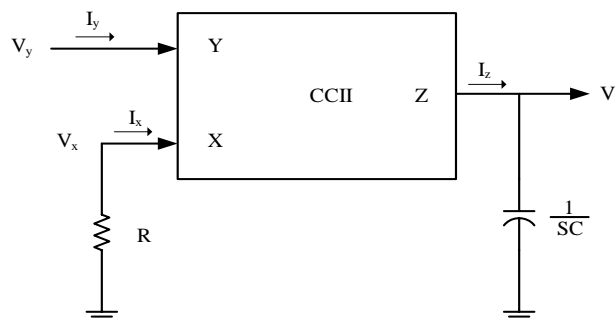
一般最簡單的積分器是使用一個運算放大器及一個浮接式電容器來做積分電路如圖(六)所示，其方程式為(3-1)式。在 1970 年 A. Sedra 和 K. C. Smith 提出使用一個接地電容器，一個電阻器和一個電流式主動元件設計出積分器[2]，其最大的好處便是使用一個接地電容器，使其更容易於積體電路化實現。其方塊圖如圖(七)所示。分析電路之後可以推導出公式(3-2)(3-3)(3-4)證明所提之電路符合理論為一個積分電路。

$$v_o(t) = -\frac{1}{CR} \int_0^t v_i(t) dt + v_o(0)$$

$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{1}{sCR} \quad (3-1)$$



圖六簡單的米勒積分器



圖七 CCII 的電壓式積分器

根據電流傳輸電路特性由公式(2-2)(2-3)可以得出(3-2)

$$V_x = V_y \quad I_z = \pm I_x \quad (3-2)$$

代入電路並取拉式轉換(Laplace Transform) 並取  $V_z$  之初值為 0 以利計算

$$V_z = I_z \cdot \frac{1}{sC}$$

$$I_x = \frac{V_x}{R} = \frac{V_y}{R}, \quad V_y = I_x \cdot R = (\pm I_z) \cdot R$$

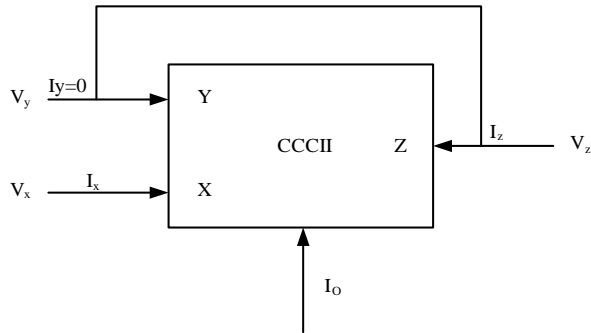
$$\frac{V_z}{V_y} = \frac{I_z \left( \frac{1}{sC} \right)}{\pm I_z (R)} = \pm \frac{1}{sCR} \quad (3-3)$$

將上式取反拉式轉換使其返回時域(Time domain)，得到積分方程式

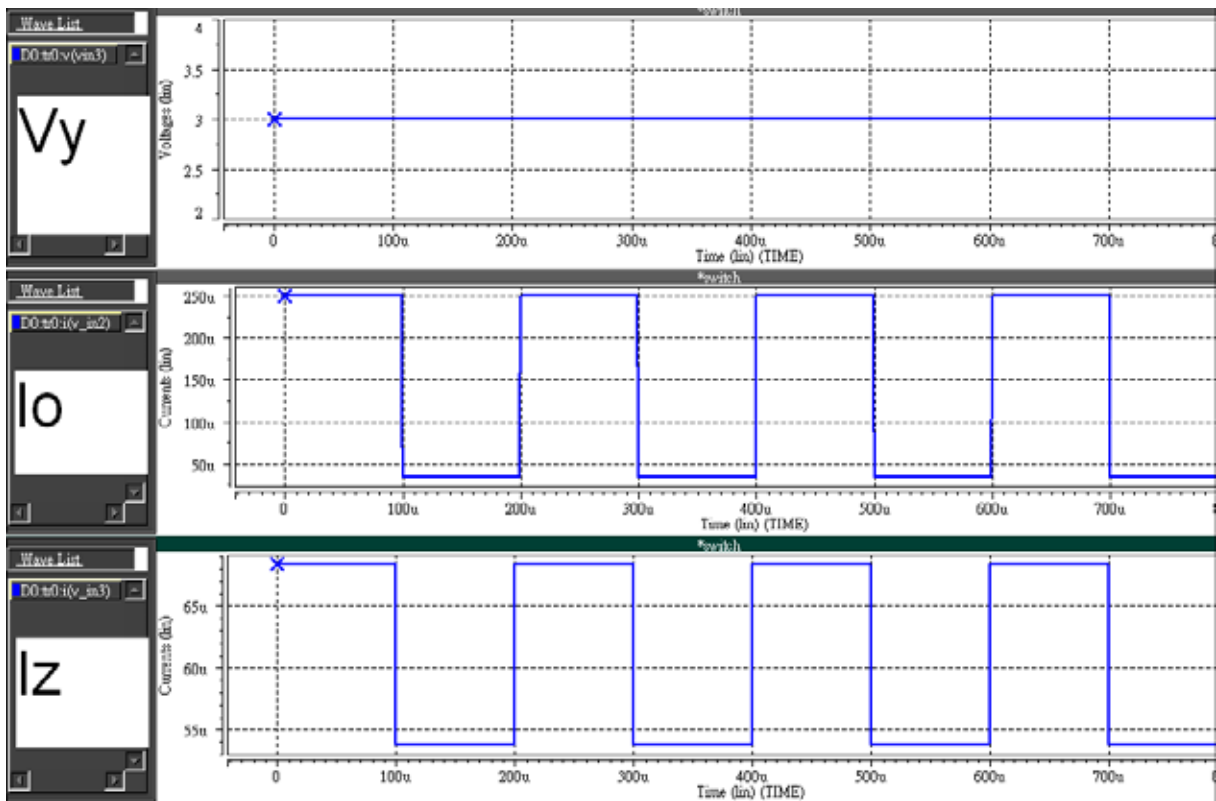
$$V_z(t) = \pm \frac{1}{CR} \int_0^t V_y(t) dt + V_z(0) \quad (3-4)$$

### 3-2. 電流式開關電路

本文使用 CCCII 做出一個開關電路，其方塊圖如圖(八)所示，模擬輸出結果顯示於圖(九)，分析電路之後可以推導出公式(3-5)(3-6)(3-7)證明所提之電路符合理論為一個開關電路。



圖八 CCCII 的電流式開關



圖九 CCCII-開關模擬結果

根據電流傳輸電路特性由公式(2-5)(2-6)可以得出(3-5)

$$R_x = \frac{V_T}{2I_O} = \frac{V_X - V_Y}{I_X}, \quad V_X = V_Y + R_x I_X, \quad I_Z = \pm I_X \quad (3-5)$$

因此令  $V_y$  = 定值，當  $I_o=0$  時  $R_x=\infty$  可視為開路

$$R_x = \infty, \quad I_x = I_z = 0 \quad (3-6)$$

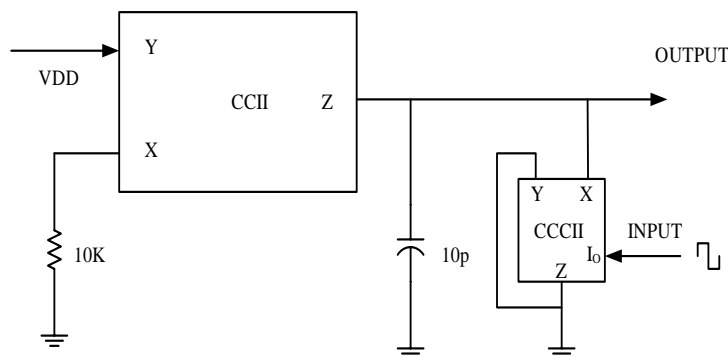
再令  $V_y = \text{定值}$ ，而當  $I_o > 10V_i$  時  $R_x \doteq 0$  可視為短路

$$R_x = 0, I_x = \pm I_z \quad (3-7)$$

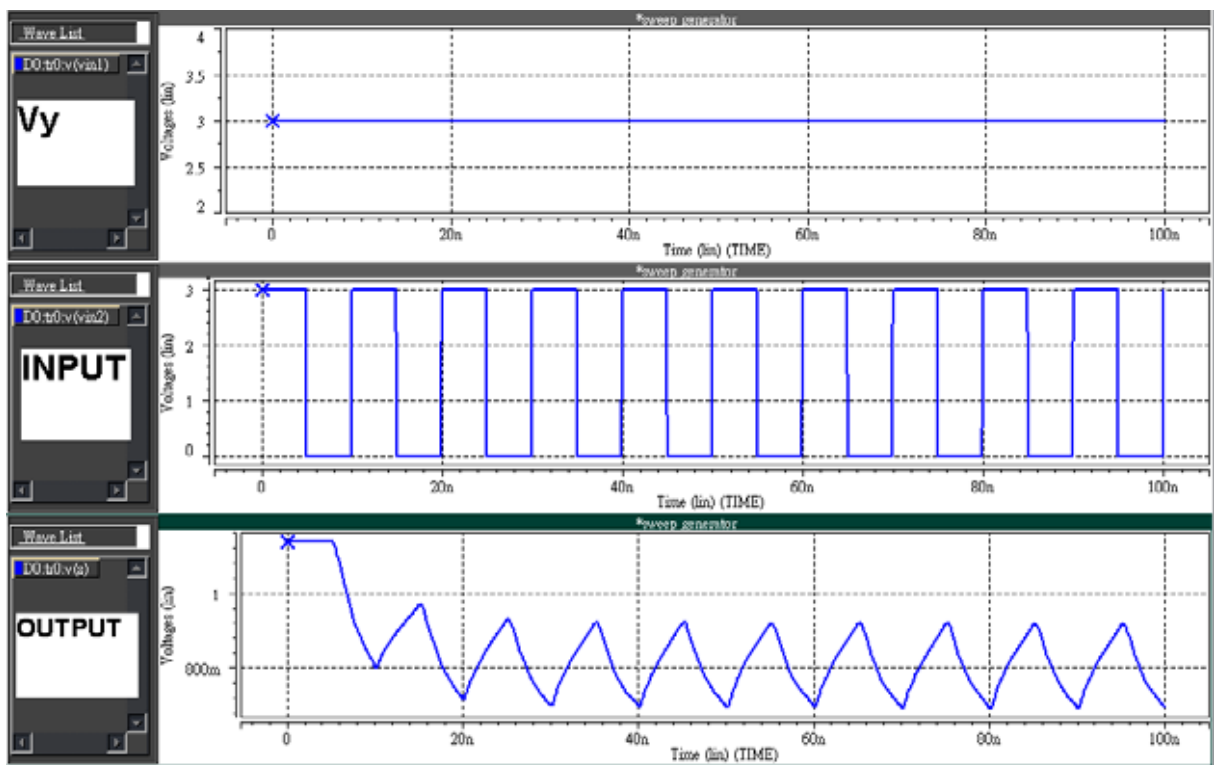
#### 四、電壓式積分器電路與電流式開關電路應用

##### 4-1. 三角波產生器(Triangle-wave Generator)

本文使用 CCII 積分器設計出一個新型的三角波產生器，並只需在接地電容器旁並接一個 CCCII 開關電路既可設計出三角波產生器，此時  $V_{in}$  接到高電位，CCCII 開關由輸入脈波控制，脈波頻率為 100MHz，在脈波為 Low 時電容器充電(CCCII 開關為 OFF)，電容器在脈波為 High 時放電(CCCII 開關為 ON)，Z 為輸出端，可得出所需的三角波，圖(十)所示為新的三角波產生器其電阻值為 10KΩ 電容器值為 10pF，模擬輸出結果顯示於圖(十一)。



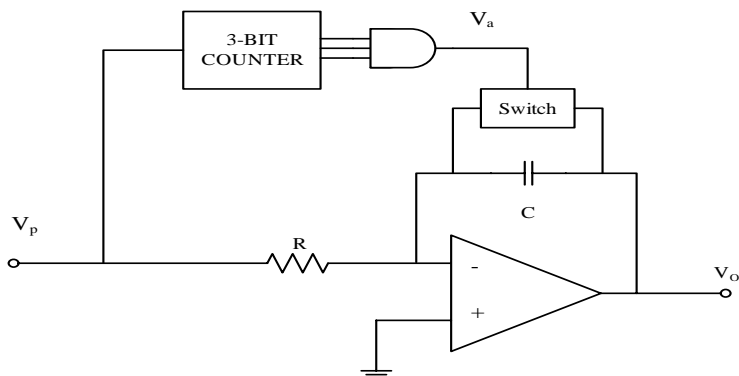
圖十 新的三角波產生器



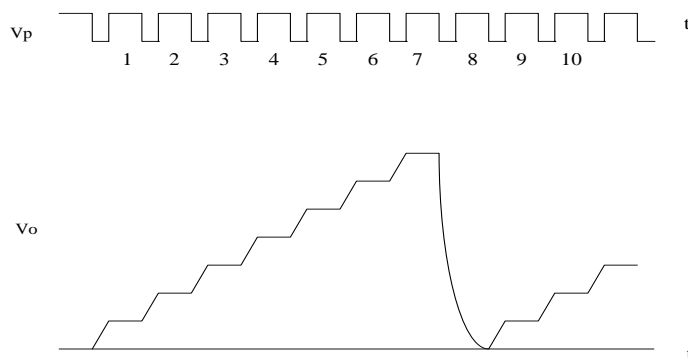
圖十一新的三角波產生器輸出波形

### 4-2. 階梯波產生器(Staircase-wave Generator)

一簡單的階梯波產生器圖(十二)所示，參考 Jacob Millman 和 Arvin Grabel 的微電子學[6]，它是由一個運算放大器及一個浮接式電容器所做的積分器，一個 3 位元計數器(Counter)，一個 AND GATE 一個開關及一個浮接電阻器所構成，當  $V_p$  為 High 時電容充電，而  $V_p$  為 Low 時電流流經 R 電阻的電流等於零，此時電容器不放電，電容器累積電荷而產生階梯電壓波，當  $V_a$  端輸出的 COUNTER 計數到 7 時，AND GATE 輸出為 High，開關 ON 電容器放電，如圖(十三)所示。

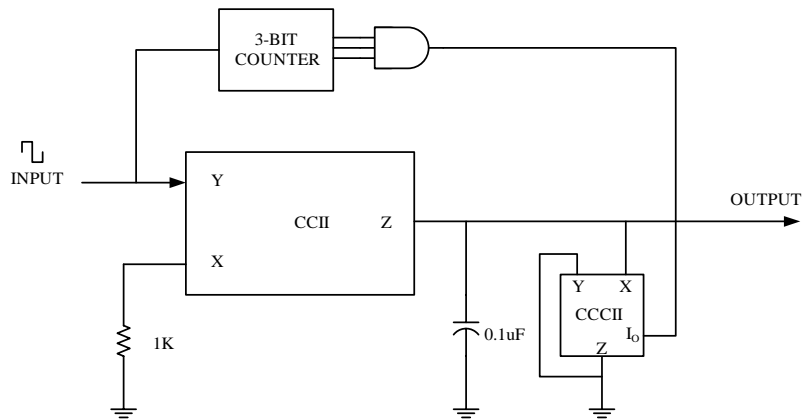


圖十二 階梯波產生器

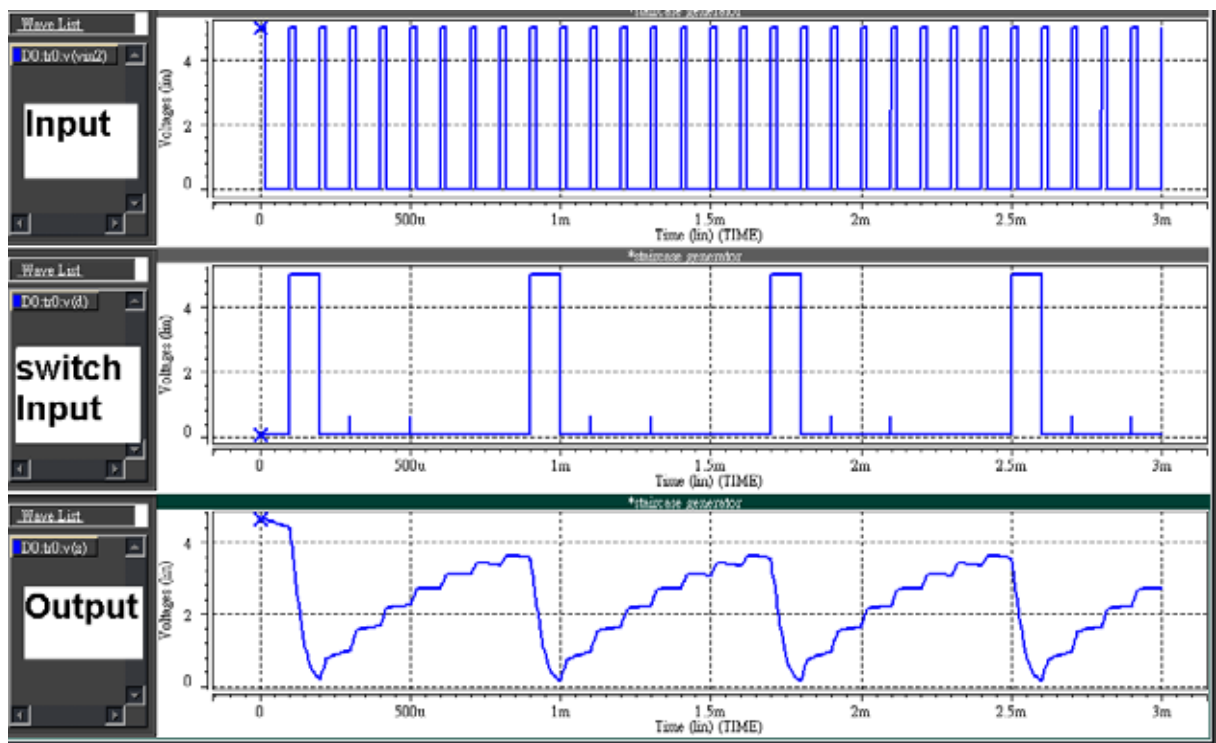


圖十三 理想階梯波產生器輸出波形

而本文使用 CCII 積分器設計出一個八階階梯波產生器，是以 4-1 節所提出新的三角波產生器之電路原理延伸設計，其主要再多加上一個 3 位元計數器(Counter)，一個 AND GATE，一個接地電阻和一個接地電容器設計出，其中 Y 為輸入端，輸入波型為方波，當 COUNTER 自 0 數到 7 時 AND GATE 的輸出為 Low，CCII 開關為 OFF，Y 為輸入方波的 High 時，電容器上累積電荷而產生階梯電壓波，自 Z 端輸出的 COUNTER 計數到 7 時，AND GATE 輸出為 High(但有延遲)，CCII 開關 ON 電容器放電，如圖(十四)所示其中電阻值為  $1K\Omega$  電容器值為  $0.1\mu F$ ，模擬輸出結果如圖(十五)所示。



圖十四 階梯波產生器



圖十五 階梯波產生器輸出波形

## 五、結論

使用電流式主動元件設計電路，因為有較佳的頻寬、較寬的動態範圍、較大的線性範圍、較高的回轉率、較小的功率損耗以及設計簡單，因此被更多的使用者來設計出電路以取代電壓式運算放大器。

本論文所提出之三角波產生器輸入頻率可以在 100MHz 仍然可以正常動作，而一般以電壓式運算放大器所製作的三角波產生器在與本文相同的電阻值和電容值下只能工作在 1KHz 以下[7]，證明電流式主動元件其在高頻信號下的好處，並且本論文的所提出的應用電路是以較少的主動元件及被動元件來設計，使用較少的元件來設計電路意味著有著較低的電路成本，而且所設計的電路將被動元件都接地也意味著更容易積體電路化或更容易調整。

參考文獻

- [1] K. C. Smith and A. Sedra, (1968), "The current conveyor- a new circuit building block", IEEE Proc, vol.56, pp1368-1369.
- [2] A. Sedra and K. C. Smith, (1970), "A second-generation current conveyor and its applications", IEEE Trans on Circuit Theory, CT-17, pp. 132-134
- [3] A. Fabre, O. Saaid, F. Wiest and C. Boucheron, (1995), "Current controlled bandpass filter based on translinear conveyor", Electron. Lett.,31,20, pp.1727-1728
- [4] Shen-Iuan Liu, Hen-Wai Tsao, Jingshown Wu, and Tung-Kwan Lin, (1990), "MOSFET-Capacitor Filters Using Unity-Gain CMOS Current Conveyors", Electronics Letters, vol. 26, pp. 1430-1431,
- [5] Ali Toker, Ece O. G. and Serder Ö. (2001) ,"New high-Q bandpass filter configuration using current conveyor based all-pass filters," IEEE Trans. Circuit Theory, 0-7803-7057-0.165-168
- [6] Jacob Millman and Arvin Grabel, (1992), "Step (Staircase) Generators" Microelectronics, Second edition, pp.697-698
- [7]Sedra and Smith, (1998), "Generation of Triangular Waveforms" Microelectronic Circuits, Fourth edition, pp.1005-1006