

含集總元件之單面電路 (1/3)

Uniplanar Circuits with Lumped Elements (1/3)

計畫編號：NSC 91-2213-E-002-074

執行期限：91年8月1日至92年7月31日

主持人：陳俊雄 國立台灣大學電信所教授

計畫參與人員：王琦學、朱立忠、張逸

一. 中文摘要

(關鍵詞：單面電路、集總元件、混波器。)

為了發展毫米波無線通訊收發系統之關鍵元組件，本研究擬開發電路設計用模型以及電路分析用程式集，以探討具有集總元件之單面電路，並達成有效設計與模擬各類單面電路的研發目標。

本研究的內容包括：設計用等效電路模型的建立，分析用程式集的完成，再結合理論分析與實驗量測，來進行新型單面混波器以及相關組件的開發與詳盡探討工作。

第一年研究將以混合積分方程及動差法為基礎，以等效電流源接點法為輔，建立一套頻域全波分析模型，用以探討含集總元件之單面電路，並以晶片電容、螺旋電感、以及主動天線電路為例，來驗證此全波分析模型的可用性。

Abstract

(Keywords : Uniplanar circuit, lumped element, mixer.)

The purpose of this investigation is to develop and study the uniplanar circuits with

lumped elements so as to establish the key-component technologies for millimeter-wave wireless communication systems. The goal is to establish suitable equivalent circuit models for practical design and associated fullwave computer software for circuit simulation. In this study, the uniplanar circuits with linear and nonlinear lumped elements are investigated in detail. Specifically, several novel uniplanar mixers and related components are proposed and their properties are carefully examined, both theoretically and experimentally.

In this first-year research, a fullwave analysis model for uniplanar circuits with lumped elements is proposed. The passive distributed parts are analyzed by the mixed-potential integral-equation based moment method, and the connection between distributed parts and lumped elements are treated by the current-source port concept. In this study, the fullwave analysis model is tested by applying it to the problems with chip capacitor, spiral inductor, and active slot antenna.

二. 緣由與目的

單面單晶微波積體電路的構想，首由

Hirota 及 Ogawa 等人提出。單面電路的元、組件及導體，僅佔用基板的單一平面，而具有以下優點：串聯與並聯主、被動元、組件容易，易於加接直流偏壓，因此可簡化積體電路的製程，大幅降低電路的價格。

連接單面電路元、組件的要件為單面傳輸線，依結構可分成：共面波導 (Coplanar waveguide, CPW)、槽線 (Slotline, SL)、及共面帶線 (Coplanar stripline, CPS)。共面波導、槽線、及共面帶線之導體均共用同一平面，三者經適當組合，可簡化積體電路架構及製程，也可改善電路特性，因此於單晶微波及毫米波積體電路的發展過程中，頗受世人的注意。

雖然單面電路擁有多項的優點，但其電路結構頗為複雜，故在元、組件分析上，需要建立可靠的分析模型。尤其使用頻率越來越高，電路使用面積越來越小的趨勢下，各種電磁效應愈形重要而無法忽略，而需更有效的分析模型，來進行單面電路的設計與模擬工作。

針對含集總元件的電路，過去研究曾適當結合集總元件模型與全波分析方法，而有效解決這類的問題。在時域方面，已發展方法含：有限差分時域法 (FDTD) 及有限元素時域法等，這些方法均可探討各類集總元件、傳輸線、以及電路組件間的結合問題，但於設計分析時，須花費大量的時間與硬體資源，使得這種方法的推廣及應用，頗受限制。

在頻域方面，欲將集總元件一起納入電路分析模型中，特引入內部節點的結合方法，使得頻域全波分析法，也能用於處理如振盪器或混波器的電路上。但有關頻域全波分析模型的發展，過去的研究都集中在微帶線結構上，而單面電路的設計與分析，則相對的偏少而更待開發與解決。本研究擬以頻域全波分析法為基

礎，提出一種有效的電路分析模型，來設計與分析含集總元件之單面電路，並以單面混波器及相關組件之探討為主軸，來開發含集總元件單面電路之分析模型。

混波器是無線通訊系統中之一個重要組件，依據訊號饋入的方式，混波器大約可分為：單元件式、單平衡式、及雙平衡式三類。單元件式混波器之電路架構最簡單，而常用在超高頻率的通訊系統上。但若考慮到各端點間的隔離度問題，則平衡式架構才是最佳的選擇。無論是單平衡式或雙平衡式架構，最重要的組件是將非平衡訊號轉換為平衡訊號的轉換組件，常見的有 T-接頭、魔術 T、環形共振器、混成耦合器、Lange 耦合器、以及平衡至非平衡轉接器 (Balun) 等。而過去相關的研究工作，較偏重於以金屬波導、帶線、以及微帶線為基礎所設計的混波器。

單面電路之開發過程中，混波器依然可以使用類似的架構來達成。單元件式架構，則常用於發展超高頻段的混波器、以及諧波混波器。在平衡式的架構上，所有的轉接器與耦合器，亦可以共面波導、槽線、及共面帶線等來實現，進而開發出相關的單面混波器。

有別於微帶線架構的混波器，單面電路可利用單面傳輸線間之轉接器，如共面波導至槽線轉接、或共面波導至共面帶線轉接，來設計平衡架構的混波器，並利用兩種傳輸線之間模態的隔離特性，可製作出隔離度相當高的平衡式單面混波器，不過由於模態轉換的特性相當複雜，較缺乏有效且精確的分析工具。

本研究擬以頻域全波分析模型為基礎並將其推廣，期能用於含集總元件單面電路之分析與設計之上，同時針對各種混波器可能使用的單面組件，進行等效電路模型的建立，期望

在理論與實驗方式的交相驗證下，得到最佳的設計工具。接著再以所建立全波分析模型，進行小型化新型單面混波器的開發工作，尤其針對轉接型的平衡式混波器，將建立一套精確有效率的設計工具，由此改良其結構與特性，以達到開發小型化單面混波器的目標。

三. 研究方法與結果

1. 全波分析模型

第一年主要建立一套適用於單面電路上，並可結合集總元件的頻域全波分析模型。

此研究採用混合積分方程(Mixed potential integral equation)[1]，作為全波分析的基礎。考慮單面電路之主要傳輸線為共面波導(Coplanar waveguide)或槽線(Slotline)，同時為了防止連接集總元件時，額外引進的數值誤差[2]，而選擇開槽處未知磁流及空橋上未知電流為積分方程之未知數，以適當的基底函數展開，再利用動差法求解所得之混合積分方程，可得待解之磁流及電流。

2. 等效電流源接點法

動差法求解過程之磁場激發項可以圖一(b)表示，當激發源置於兩緊鄰未知磁流之分割間時，由於分割間相當靠近，可假設其間之磁場激發源分佈平均且可表示成

$$H^{ex}(\vec{r}) = \frac{I_i}{\Delta} \quad (1)$$

其中 \vec{H}^{ex} 為磁場激發源， I_i 為等效電流，而 Δ 為兩磁流分割間的距離。如此再代回混合積分方程，經動差法求解後之磁場激發項可得

$$\iint_S \Lambda_i(\vec{r}) H^{ex}(\vec{r}) ds = \delta_{ij} I_j. \quad (2)$$

其中 $\Lambda_i(\vec{r})$ 為磁流之基底展開函數。

經由方程式(2)，可將激發磁場以等效電流源取代，並將其引入集總元件之電壓對電流方程式，即可獲得包含集總元件及分佈元件之整體全波分析結果[3]。

由於數值計算的誤差，緊鄰兩磁流分割間的距離雖很小，但仍會引進一點數值運算造成的串聯電感效應，整體的等效電路模型可以圖二表示。為避免此數值電感誤差，我們延伸了 Gillard 等人[2]提出的對策，以並聯多個等效電流源接點來減低數值電感性的誤差效益。

3. 驗證

為驗證全波分析模型的可用性，首先考慮一晶片電容問題，即在兩共面波導間串聯了一個 1pF 晶片電容而如圖三所示，並量測其反射係數。同時比較了使用三個及五個並聯等效電流源接點的模擬結果，可發現並聯多個等效電流源接點，確實可降低數值電感的誤差效應。此外，圖三(b)還秀出使用串聯負電感，來抵銷數值電感誤差的模擬結果，雖然此法的修正效果最好，但由於必須先得到正確的數值電感誤差值，才能正確的修正誤差，在較複雜的電路結構下，正確的數值電感誤差值並不易決定，使得使用負電感修正法受到很大的限制。

接著，再利用一螺線電感(Solenoid inductor)電路，來探討等效電流源接點方法的特性，其分析的結構如圖一(a)所示，其中之集總元件為一螺線電感(約 65 nH)，串聯於兩共面波導間。圖四為其穿透及反射係數之量測及模擬結果，圖四中亦比較了利用[4]中提出的等效電壓源法，模擬串聯螺線電感問題所得的穿透及反射係數。由量測的結果可以看出，除了串聯螺線電感本身的電感性，還包含了兩共面波導末端間的離散電容性。所以穿透係數約在 1.5 GHz 會產生一個共振點。觀察由[4]所提之

等效電壓源所預測的結果可以發現，當未經過分段串聯修正[2]時，共振點低於 1 GHz。這是因為等效電壓源方法，假設將集總電路置於無限靠近的兩傳輸線間，如此在無限靠近的兩傳輸線末端，會產生強烈的電場耦合效應，而使模擬結果引進了一個很大的並聯電容誤差，所以當未進行修正時，共振點較量測值低很多。使用分段串聯修正後，可看出其並聯電容效應的確有效的降低，共振點發生在約 1.2 GHz。但是等效電壓源方法，需將集總電路置於無限靠近的兩傳輸線間，而改變了原本兩傳輸線間實際的距離，所以並無法正確的預測出由兩傳輸線末端所產生電容性的耦合量，即使使用了修正方法，仍無法得到正確的模擬結果。而使用等效電流源接點方法的分析結果，由於不需將集總電路置於無限靠近的兩傳輸線間，所以不至於破壞電路本身的結構，而可以正確的預測包含集總電路及分佈元件整體效應的電路表現。

4. 應用

本研究所提的全波分析模型，不僅可以使用在包含集總電路及分佈元件電路的分析上，也可以使用在複雜大型電路的分析過程。圖五(a)為一單晶微波積體電路常用的螺旋電感(Spiral inductor)串聯電路。在進行全波分析時，由於電感本身結構較為複雜，而使整體電路在分析上複雜度也同時提高。若能將複雜的電感與簡單的傳輸線分開處理，則可大大降低分析過程所需的時間及運算資源。圖五(b)顯示將電感與傳輸線分開分析，再以等效電流源接點接合模擬的結果，此外亦含直接分析整體電路的模擬結果，以及單一螺旋電感不包含傳輸線結構影響的模擬結果。由結果比較可得知，將電感與傳輸線分開分析依然可以獲得準確的結果。在需求解的未知數方面，整體計算的未知數個數有 409 個，而分開計算則只需 375

個(248 個為螺旋電感所需的未知數個數，127 個為傳輸線結構所需的未知數個數)。同時，所花費的計算時間約減少 2.15 倍。

除上述雙埠被動元件電路外，也可將此全波分析模型運用於連結主動多埠元件與分佈元件的電路。圖六顯示一平面波導饋入槽線式主動天線的模擬結果。圖中亦比較了[5]所分析的結果及其量測的結果。由於[5]中之分析方法，為連接主動元件亦需改變原來分佈元件的幾何結構，所以無法正確模擬實際結構的響應，而有較大的誤差。而使用等效電流源接點的分析方法，則可得到較佳的結果。

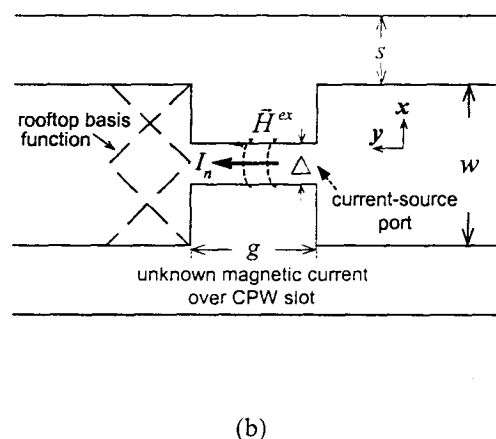
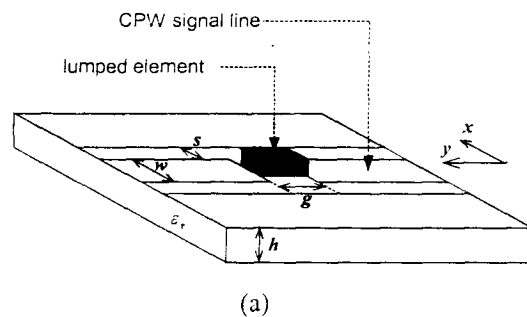
四. 結論

本研究提出等效電流源接點的觀念，來建立可連結分佈元件與集總元件的全波分析模型。此種模型的基礎為頻域混合積分方程，於動差法求解過程中，利用磁場激發項可以簡化為一等效電流源的性質，將此電流源代入集總元件的電壓與電流關係式，可達到連結電流資訊與磁場資訊的目的，並可在分佈元件為主的全波模擬上，進行包含集總元件與分佈元件的全域分析。

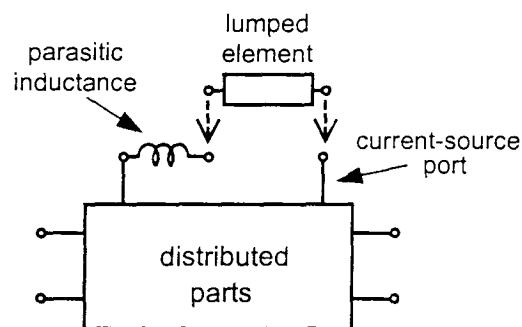
本研究顯示，使用等效電流源接點的分析方法，由於不必為連接集總元件而改變分佈元件部分的幾何結構，所以在模擬結果的預測上，有較為準確的表現。同時若能適當的將複雜電路，利用等效電流源接點方法予以分開處理，則可使電路分析過程更為有效。

五. 參考文獻

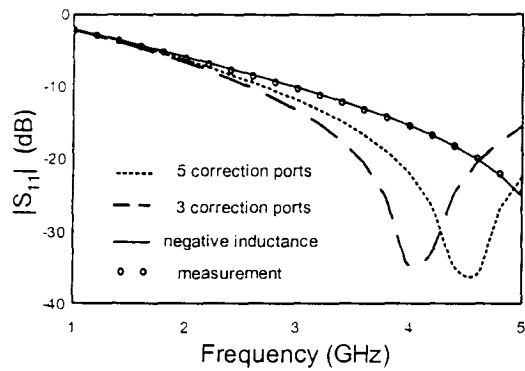
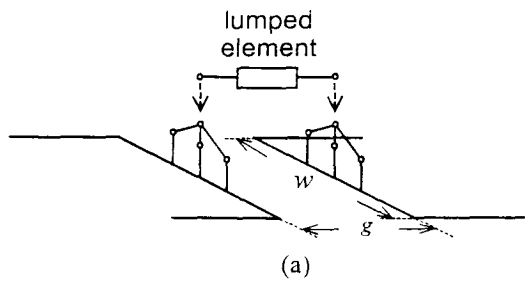
- [1] J. Sercu, N. Fache, F. Libbrecht, and P. Lagasse, "Mixed potential integral equation technique for hybrid microstrip-slotline multilayered circuits using a mixed rectangular-triangular mesh," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 43, pp. 1162-1172, May 1995.
- [2] R. Gillard, S. Dauguet, and J. Citerne, "Correction procedures for the numerical parasitic elements associated with lumped elements in global electromagnetic simulators," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 46, pp. 1298-1306, Sept. 1998.
- [3] C. -H. Wang, H. Wang and C. H. Chen, "A full-wave analysis model for uniplanar circuits with lumped elements," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 51, pp. 207-215, January, 2003.
- [4] M. B. Steer et al., "Global modeling of spatially distributed microwave and millimeter-wave systems," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 47, no. 6, pp. 830-838, June 1999.
- [5] E. Vourch, M. Drissi, and J. Citerne, "A full-wave analysis of active uniplanar structures," in *IEEE AP-S Int. Symp. Dig.*, June 1995, pp. 1062-1065.



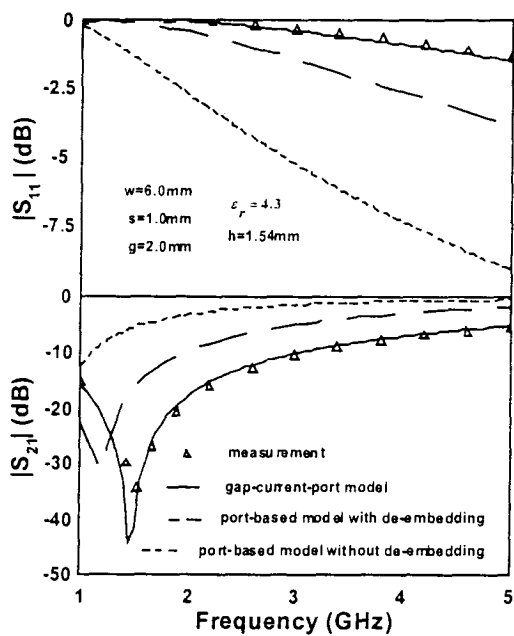
圖一. (a) 包含集總元件之單面電路，(b) 等效電流源接點法之示意圖。



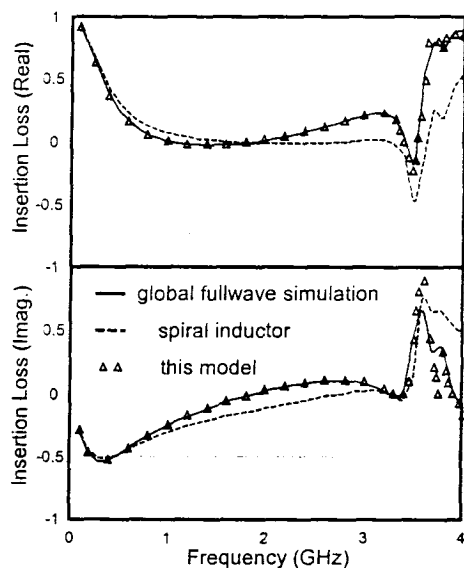
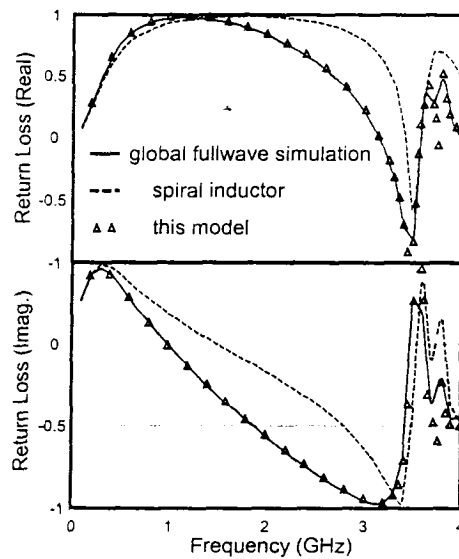
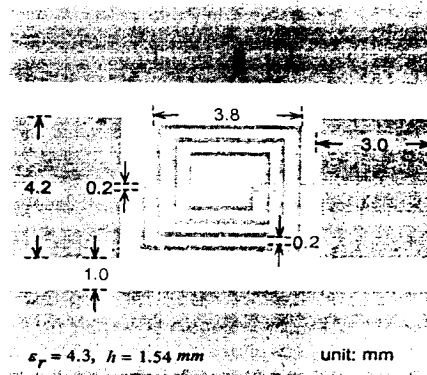
圖二. 包含數值電感性誤差之等效電流源接點法示意圖。



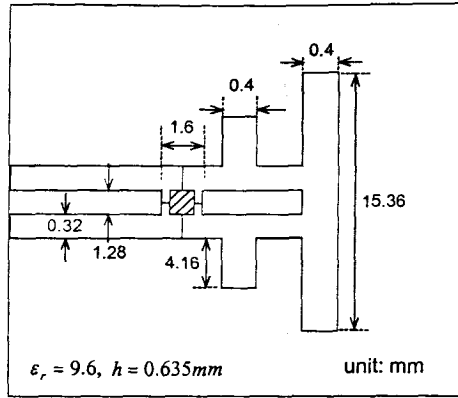
圖三. (a) 降低數值電感誤差之多接點並聯示意圖, (b) 串聯電容電路中, 並聯接點數對其反射係數之影響。



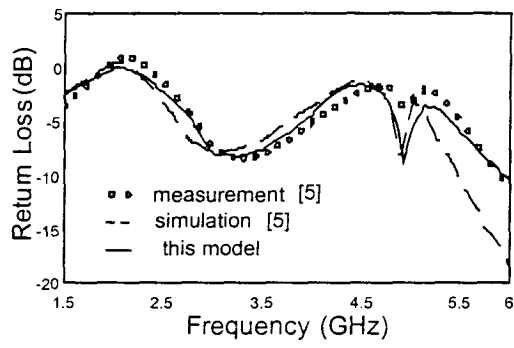
圖四. 串聯螺旋電感(Solenoid inductor)共面波導電路之穿透及反射係數結果(量測及模擬)。



圖五. (a) 串聯螺旋電感(Spiral inductor) 電路結構, 及其模擬結果: (b) 回波損失與 (c) 植入損失。



(a)



(b)

圖六. (a) 主動天線電路結構，(b) 模擬與實驗結果。