

應用頻率調變連續波雷達於液體之量測研究

蘇文寬¹ 朱景華^{2*} 郭明貴¹ 陳振興¹

¹國防大學理工學院電機電子工程學系

²國防大學理工學院國防科學研究所

摘 要

本論文主要是在研究使用頻率調變連續波液面雷達(編號TKNR),量測儲存槽內三種不同形式之液體,包含自來水、食用油及柴油。該雷達回波經由介質層之電磁波傳遞,分析訊號變化,運用多重高斯函數進行傅利葉頻譜的拟合,可由頻譜顯示出儲存槽內液體之位置與位準。這個研究結果可以提供使用頻率調變連續波液面雷達監測儲存槽內液體之參考。

關鍵詞: 雷達, 頻率調變連續波雷達, 頻譜

Measurement Studies of Liquids using FMCW Radar

Wen-Kuan Su¹, Jin-Hwa Ju^{2*}, Ming-Kuei Kuo¹, and Jenn-Shing Chen¹

¹ *Department of Electrical and Electronic Engineering, Chung Cheng Institute of Technology, National Defense University*

² *Graduate School of National Defense Science, Chung Cheng Institute of Technology, National Defense University*

ABSTRACT

The measurement studies of three types of liquids, including water, vegetable oil and diesel, in a tank using a TKNR FMCW radar are presented. The radar returns are analyzed with the use of Fourier transformation to acquire their spectrum, then fit with the Gaussian function. The spectrum positions and levels are illustrated by the electromagnetic wave propagating through dielectric layers. The findings may provide a useful tool for monitoring the liquids in a tank.

Keywords: radar, FMCW radar, spectrum

一、前言

隨著科技的發展及工業的需求，早在1976年第一個微波雷達便已進入商業市場，然而在多項不特定因素的限制下，一直無法被廣泛的應用在小區域和高解析度之偵測環境上，例如高度僅數米到數十米之儲存槽和介電常數較低之液體介質，但在1995年Brumbi首先提出小型微波液面雷達後開始有了轉機[1]。

微波雷達的種類甚多，因環境或需求的不同，其結構設計亦有相當之差別。一般在近距離量測時(液體高度量測)，大部份是使用頻率調變之連續波雷達(Frequency Modulating Continue Wave Radar, FMCW Radar)，原因在於其體積小，準確度高，無距離量測死角，且價格比一般脈波式雷達較為低廉。綜合來說，頻率調變連續波雷達在液態物質的感測上具有下列優點[2-5]：

1. 低發射功率：因為FMCW雷達所發射之信號為一掃頻之連續波，相較於脈波式雷達(Pulse Radar)而言，欲偵測相同距離或大小之物體，發射機所需發射之瞬時功率通常較低，對於系統之干擾顯然較為輕微。
2. 無近距離之限制：因為對於脈波式雷達(Pulse Radar)而言，發射機所需發射之瞬時功率較高，因此距離太近的物體所產生的回擊波，將比較容易為發射信號所遮沒，而導致無法辨認的情形。
3. 中頻頻寬低，適合數位訊號處理，可達到更高的準確度：這是一個極重要的特性，因為以數位訊號處理器而言，處理速度越快，數位訊號處理器的成本越高，將導致商業產品的失敗。
4. 高頻模組結構單純，具有低價之潛力。
5. 體積小。
6. 機構簡單。

雖然如此，FMCW雷達在面對低液面、低介電常數、高揮發性、高爆性、高蒸氣壓、高溫差、高擾動和多重之液面的精確量測上，仍舊存在許多難以解決的問題，不斷的困擾著科學家們。其關鍵在於電磁波之波長和在介質中傳播的特性因素。若以短波長之電磁波為偵測波為例，雖具有較高之空間解析度，但在介質之吸收和單位空間損耗上卻明顯偏高，亦不利於大面積之測量。反之，以長波長之電磁波為波源的情況下，則可能面對空間解析度以及

偵測範圍等限制問題。因此感測器之設計，通常會根據使用者需求選擇最佳化之設計。環顧目前市面上之採用X頻段之FMCW雷達，它的空間解析度在50M以內的要求約在數毫米以內。這樣的要求，對偵測低介電常數(如柴油)之FMCW雷達而言實具有挑戰性。因為電磁波在行經多層電介質系統時，會產生反射和折射現象，故反射波信號會呈現電介質之許多特性，例如介電常數和厚度等特性。所以即使忽略電磁波發射和接收問題，電磁波在干涉和繞射現象的干擾下，反射波的信號將呈現不同於量測高介電常數液體時之特性，這種非線性的變化非常不利於訊號的解讀，甚至會使液面感測雷達失效[6-7]。因此，對低介電常數的物質的量測而言，僅提高FMCW雷達的信號發送和接收能力是不夠的，還須配合適當的數學運算模式，才能解析因多重反射所造成的雷達反射波資訊。

雷達的反射波，除了可以提供液面資訊外，還包括液體的材料和空間等多項物理特性。本文嘗試以高斯函數為基底，利用重疊原理來解析量測低液面之柴油(Diesel Fuel)、食用油(Vegetable Oil)和自來水(Pipe Water)等介電常數差異甚大之液體樣品的雷達頻譜，進而獲得液體之介電常數資訊。結果可用於提升傳統FMCW雷達之功能，使其在面對低介電常數或低液面之液體時，仍能正確解讀液面資訊，並提供待測液體之介電常數資訊。

二、理論介紹

目前運用液體量測的產品有很多種[8-11]，根據量測的方式可分為接觸式與非接觸式(Non-Contact)兩種。接觸式是使用固體之儀量具型的量測方式，主要應用在如短距離、低破壞性和低污染等液體。非接觸式的量測方式則透過聲波或電磁波等波動特性變化達到偵測之目的。因此可避免因接觸無法直接觸碰之樣品所造成之問題產生。特別是電磁波，因波長範圍相當廣泛，因此量測的範圍可從原子之大小到星球之距離皆適用。傳統之非接觸性量測儀器依使用之波動的種類可分為幅射計、雷射測距儀、超音波測距儀、微波測距儀等四種。其中微波測距儀，又稱FMCW雷達是常見之液體測量儀器，其原因在於微波可解決幅射保護問題，介質對光波吸收和反射問

題，空氣濃度及溫度變化對聲波之干擾等影響精確度之問題。加上 FMCW 雷達，不僅僅可以透過偵測傳播在介質中之電磁波的特性以獲得距離之資訊，對於偵測液體之其他特性亦可有效偵測。

雷達或感測系統依偵測波之操作型態來分，大致可分為脈波式和頻率調變連續波式兩種。脈波式雷達系統，主要是使用具有時間間格之不連續的脈衝波為偵測波，藉由回波強度的變化和時間差來獲取待測資訊。FMCW 雷達系統是使用頻率連續之電磁波為偵測波。然而頻率連續之電磁波是無法直接用於偵測待測目標，它必需以一個時變的信號 (Time-Variant Signal) 加以調變。

FMCW 雷達是一種利用調變偵測電磁波之頻率而達到待測資訊的感測系統，是一種非接觸式的量測技術。用於偵測液體時，此種感測系統具有高機動性、靈敏度、動態範圍 (Dynamic Range)、解析度 (Resolution) 和隔離度 (Isolation) 等特性，又可即時量測。FMCW 雷達的工作原理如下，先將訊號產生器 (Sweep Generator) 產生之感測訊號，經由功率分配器 (Power Divider) 將訊號分為二部份，其中一部份送至天線並發射至自由空間中作為偵測訊號，第二部份為參考訊號。待偵測訊號由物體反射後，經由接收天線接收並與參考訊號混波後產生中頻訊號 (IF) 的雷達訊號，最後再由電腦進行解析。

FMCW 雷達系統可以偵測出目標物的距離，其中主要是因為回擊波在介質中行進的時間所造成的延遲時間，而導致回擊波與發射訊號之間有一頻率差 (F_b)，如圖 1 所示，其差值與距離 (R) 成正比，經由幾何關係可求得 (1) 式，

$$f_{IF} = \frac{4r}{c} f_m b \quad (1)$$

其中 f_m 為調變率， f_{IF} 為中頻訊號， r 為待測物距離， c 為光速， b 為調變頻寬。 f_0 為發射頻率， f_s 為掃頻頻寬 (Sweep Bandwidth)， f_b 為最大頻率差值的二分之一。因此我們可將訊號透過分析處理而計算出目標物之距離。

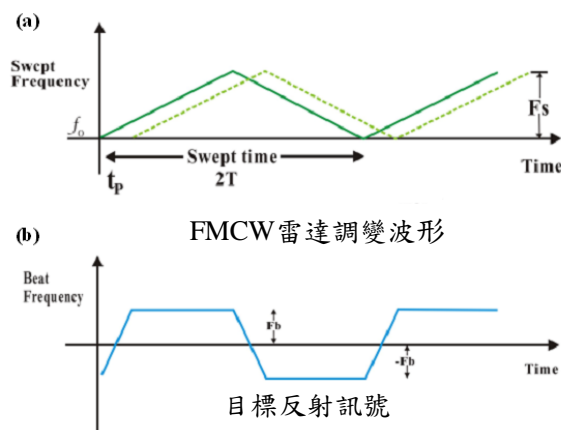


圖 1. (a) 線性頻率調變後收、發系統的訊號圖
 (b) 收發頻率差關係圖

圖 2 為液面和反射訊號關係之示意圖，其中 L 為儲油槽高度， h_v 為訊號經過空氣再經過介質液體後的高度，訊號的行進距離會因為介質的改變而改變行進的距離， a 為感測器到液面間的距離， c 為空氣中的速度， v 為待測介質中的速度。對低介電常數之液體而言，利用光在液體與空氣中傳播數度的差異可獲得 (2) 之介電常數與測量高度的關係式，其中 h 和 a 分別為常數。

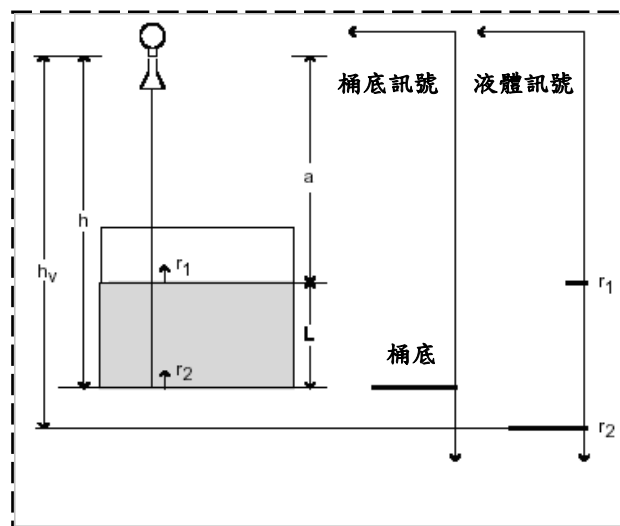


圖 2. FMCW 雷達之液面和反射訊號關係示意圖

$$\epsilon_r (h_v) = \left(\frac{h_v - a}{h - a} \right)^2 = \left(\frac{c}{v} \right)^2 \quad (2)$$

如 $a=100\text{mm}$ ， $h=200\text{mm}$ ，水、食用油及柴油之 h_v 分別為 1100、300 及 500mm，運用

公式運算，水、食用油及柴油之介電常數分別為 81、4 及 16，若已知液體介電常數，則(2)式可改寫為(3)式，進而獲得液體的深度 L 。

$$L = h - a = \frac{h - h_v}{1 - \sqrt{\epsilon_r}} \quad (3)$$

為了要能精確地掌握在量測過程中溫度跟壓力的相互關係，得到方程式(4)式，其中 c_0 為在儲存槽內的傳播速度， c 為在空氣中的傳播速度， $\epsilon_{r,N}$ 在儲存槽內的介電常數， p 為壓力(大氣壓力)， T ：溫度(K)。

$$\frac{c_0}{c} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\epsilon_{r,N} - 1) \cdot \frac{273.15 \cdot p[\text{bar}]}{T[\text{K}]}}} \quad (4)$$

如圖 3 所示，依據反射和穿射原理，當電磁波由空氣進入液體時，會產生反射波和穿射波。對高介電常數液體而言(實線)，如水，因反射波遠大於穿射波，所以即使在很低的液面反射波仍會有效的返回感測系統，達到偵測液面的目的。然而當經由桶底反射回液面的穿射波強度增強時，返回感測器之反射波將不再只有液面資訊(虛線)，而是包含液體的厚度、反射和吸收特性，若能用適當數值解析方式進行分析，則可獲得液體介電常數之資訊。

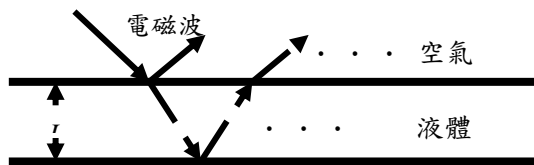


圖 3. 電磁波在介質之反射路程示意圖

為求得其介電常數，我們也針對不同液體在同一液面高度的情形下，使用多重高斯函數曲線進行數值附合，取得液面和桶底部反射之訊號，作為計算液體介電常數之依據。高斯函數的形式如(5)式所示，其中 A 代表峰之強度， w 為峰之半高寬度， x_c 表示峰之中心位置。

$$y = y_0 + \frac{A}{w\sqrt{\pi/2}} e^{-\frac{(x-x_c)^2}{w^2}} \quad (5)$$

三、量測方法與步驟

為了驗證研究數值解析之方法，圖 4 為整個實驗之架構圖，本研究係使用台灣均利公司(U&U)所生產之 FMCW 液面雷達[型號 TKNR]進行液體量測實驗，其中 TKNR 雷達包含一組天線系統(含耦合器、導波管、天線)、控制模組、射頻模組和電源供應器。因為 TKNR 的資料計算流程已經程式化不方便更改，所以我們利用訊號擷取卡(DAQ 卡)與個人電腦，從信號發射和接收端取得量測資料以便進行數據分析。TKNR 操作頻率 9.5~10.5GHz，對金屬反射面而言，空間解析度為 3mm (17m 以內)。

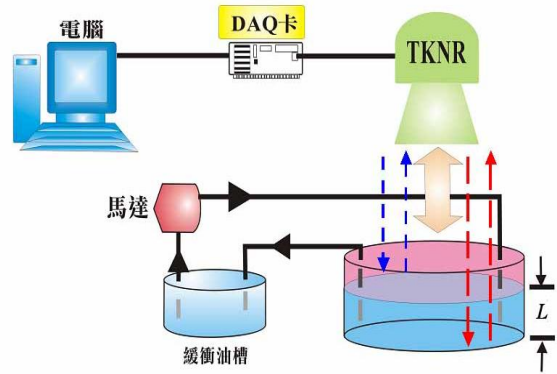


圖 4. FMCW 雷達系統架構圖

以下就其測量程序與儀器架設之步驟說明之：微波感測器架設時，由於其號角天線為指向性天線，所以將微波感測器置於儲存槽的正上方，以降低其雜訊回波的干擾。射頻模組訊號線連接至 NI-DAQ 卡，擷取其中頻訊號，並與電腦連結進行微波感測器回波訊號之擷取，量測時分別藉馬達抽入定量的液體，擷取回波訊號，經由 FFT 方法可得時域訊號或傅利葉頻譜圖。

分別量測水、柴油、沙拉油等三種不同液體在不同高度的回波訊號特性及三者在同一高度時的介電常數計算。

實驗項目因考量實驗室內空間問題，故僅針對兩部份進行測量：(1)改變儲存槽內液體高度；(2)改變不同介電常數之液體並判斷訊號擷取後經過分析的特性。

四、結果討論

利用圖 4 之實驗量測架構，我們首先對未盛裝液體之不鏽鋼空桶進行量測，所得之傅利葉頻譜圖請參考圖 5，其中視窗擷取函數係使用 Hanning 函數。

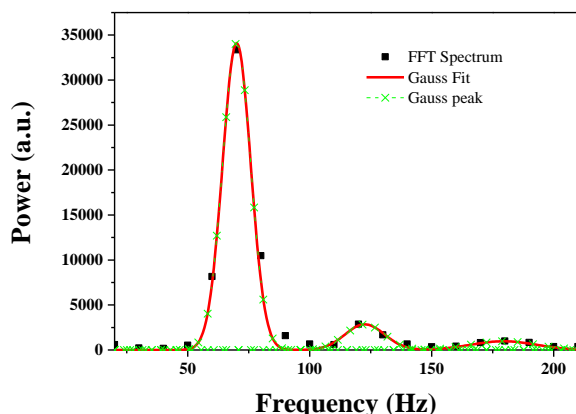


圖 5. 量測不鏽鋼空桶之傅利葉頻譜圖

從圖 5 中可發現三個隆起之信號峰，經由高斯曲線附合後，可以精確的得到三個峰之中心位置 x_c (70.004, 122.59, 179.46)、半高寬 w (11.53, 12.259, 26.64) 和面積 A (49319, 5769.283, 3226.2046)。其中在頻率 70.0045 Hz 處之信號峰所對應之 $x_c = 70.004$ Hz，可證實是如圖 2 中“桶底”所指之儲存槽桶底訊號。同理可得，第二和三個峰的位置則分別代表第二和三次反射(桶底到雷達天線間來回的多重反射現象)所造成之信號峰。另外因第二和三個信號峰的強度遠小於第一峰，且第二峰位置在 122.59 Hz 以後，半高寬亦僅 12.259 Hz，故不致影響儲存槽之距離判定。且液面升高時因量測距離縮短，所對應的頻率將更小，同時受到液體介電常數和吸收係數的影響，多重反射之雜訊峰將漂移至更高的頻率位置，所以在後續的實驗中僅探討頻率在 100 Hz 以內之頻譜。為了獲得量測液體介電常數之值，我們分別針對不同高度的自來水、食用油及柴油等液體進行量測探討。當加入之樣品的液面高度分別為 10、18 及 25.5 cm 的自來水時，所得到之 FFT 頻譜圖繪於圖 6，其中三個樣品之編號依序為 W100、W180 和 W255。

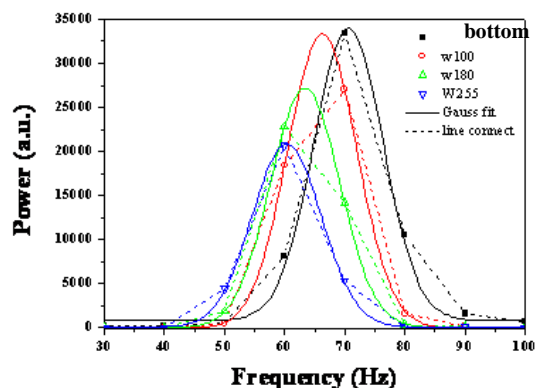


圖 6. 量測液面高度不同自來水樣品傅利葉頻譜圖

從圖 6 中可以發現，在低液面的情況下，因為水的吸收和多重反射的效果，使得從儲存槽鋼桶底部返回電磁波能量，隨液面之增加而縮減，連帶著頻譜之信號峰位置和強度也跟著改變。然而，如果直接以直線(虛線)連接頻譜數值(符號)時，頻譜的最大峰值所對應之頻率隨液面高度的變化關係並非線性，故無法有效判讀出自來水的液面高度。但是經由高斯函數(實線)附合後，可明顯發現，隨著液面高度的增加訊號峰所對應之頻率會逐漸的往低頻方向線性的縮減。因此可知即使在液面在 10 cm 的情況下，高斯函數符合之訊號峰的頻率位置仍可用以作為自來水液面之指標。

圖 7 為量測不同液面高度之食用油樣品的傅利葉頻譜結果，其中液面高度分別為 5、10、18 及 25.5 cm 時，樣品之編號依序為 VO050、VO100、VO180 及 VO255。和圖 6 同樣的我們也使用線性連結(虛線)和高斯函數的附合(實線)兩種方式來描繪 FFT 頻譜。

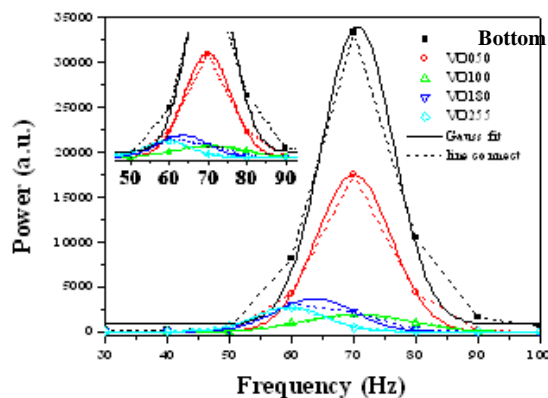


圖 7. 量測液面高度不同食用油樣品傅利葉頻譜圖

從圖 7 中我們不難發現高斯曲線的峰值隨液面的變化，明顯較以直線連接所得的峰值改變來得有規律性，所以我們在此僅討論使用高斯函數拟合之頻譜。從圖 7 中我們不難發現隨著液面的增高，在低液面時信號峰的強度出現劇烈的變化，但是在液面高於 180mm 以後強度變化則逐漸趨緩。這個變化應可歸因於食用油對此頻段的穿透係數較自來水高且吸收係數較大的緣故，所以大部分的電磁波皆穿過界面而進入食用油，但是返回液面的電磁波則因食用油的吸收使得強度隨液面升高而急速下降。當液面到達 180mm 以上時，返回液面之穿射波已經變得相當弱，所以信號峰強度的變化主要是來因液面造成之反射波的貢獻，故變化較和緩。

在圖 7 中還呈現的另一項有趣的特徵，也就是信號峰的頻率位置並非如自來水般隨液面的增加而線性的減少，卻是先增後減的趨勢。對照強度的變化後可知，因穿射波的強度高於反射波，所以在低液面時雖然會被食用油吸收，但是從桶底反射回液面之電磁波，仍舊大於液面的反射波，故信號峰所呈現的是儲存槽桶底的位置而非液面的位置。然而此時信號峰的位置之所以會大於儲存槽桶底信號所應該出現的位置，是因為食用油的介電常數遠大於空氣，所以即使路徑相同，電磁波的行進路程也會增加。但是隨著從儲油槽桶底反射回液面之電磁波的衰減至小於液面的反射波時，信號峰的強度雖然已大幅縮減，但卻不會影響頻率位置隨液面增加而減少的趨勢。因此當液面高 180mm 以上時，信號峰的位置變化又和相同液面高度的水相同。

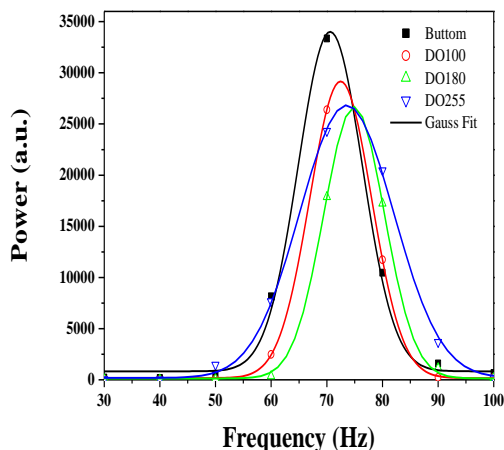


圖 8. 量測液面高度不同柴油樣品傅利葉頻譜圖

圖 8 為不同液面高度柴油的傅利葉頻譜圖，其中液面高度分別為 100、180 及 255mm 時，樣品依序被編號為 DO100、DO180 及 DO255。圖 8 之柴油量測，經由高斯曲線拟合後，可與圖 7 食用油之量測一起比對觀察，顯示隨著液面高度的增加，圖 8 柴油之量測訊號峰的位置與液面與圖 7 食用油之量測高度，僅 50mm 以下之食用油樣品之變化趨勢類似，會隨著液面高度增加往高頻方向偏移。其原因在於柴油對此頻段之電磁波而言，介電常數很小，導致大部分的電磁波皆會穿射進入柴油樣品，加上吸收係數也很低，多數的穿射波經厚約 250mm 的樣品後仍能返回液面。因此對低液面和介電常數的樣品的偵測，僅能從桶底的反射波中來判讀。在圖 7 中訊號峰值隨著液面高度增加而大幅降低，但在圖 8 中訊號峰值只隨著液面高度增加而稍微降低，同樣的，在圖 6 中訊號峰值隨著液面高度增加而大幅降低（偏移方向與圖 7 不一樣），是因自來水、食用油及柴油三者之介電係數不一樣，而形成不同的訊號現象。

然而電磁波在液體中傳輸的特性，受介質介電常數及吸收係數的影響，遠大於空氣。舉凡液體的溫度、厚度、雜質以致於電磁波的入射角度都會影響的儲存槽桶底的反射波特性。因此在解析上較為複雜，但是所隱含的資訊也較多，故可作為液體特性之感測器。

圖 9 為不同液體之液面高度對量測訊號頻率關係圖，其中 F_w 、 F_{VO} 和 F_{DO} 分別代表樣品為自來水、食用油和柴油。經比較後得知，介電常數較高的自來水樣品之信號峰位置（黑色方塊加細實線）會隨著液面高度的增加而呈線性遞減（黑色實線），且誤差範圍非常小。當樣品換成介電常數略低之沙拉油時，和先前的結果類似的，信號峰位置（紅色圓點加細實線）僅在液面高度大於 160 mm 以後才會和自來水一樣呈線性遞減的關係，且誤差量明顯較大。誤差量增大的原因是來自於液面反射波強度的降低所致，而當液面在 90 mm 以下時，信號峰位置反而隨液面增加呈線性遞增的關係，因此圖 9 之趨勢是在 90mm。此時信號峰是因為儲存槽桶底之反射波的貢獻。所以液面越高對應之信號峰位置則越往高頻方向偏移，所以同樣可作為液面高度之指標。

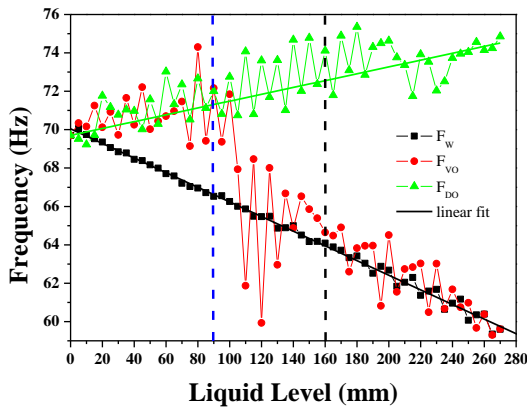


圖 9. 自來水、食用油和柴油等樣品之液面高度對量測訊號頻率關係圖

麻煩的是液面在 90~100mm 之間信號峰的位置出現的大幅增減現象。這個結果會使得液面的判別產生極大的誤差，所以必須使用不同的解析模式加以探討。再看看所有樣品中介電常數最小之柴油的量測結果(綠色三角形加細實線)，信號峰位置隨液面增加的變化，和食用油小於 90 mm 時的趨勢是一致的，且一直到 250mm 皆保持相同的斜率，只不過誤差的範圍又大了許多。因此要以此作為液面的指標，除了提高天線的增益外，改良信號之解析方式更是必要的。

除了信號峰位置之外，強度亦能提供液體之感測資訊。圖 10 為自來水、食用油和柴油等樣品之液面高度對訊號峰之面積變化關係圖，其中 A_W 、 A_{VO} 和 A_{DO} 分別代表樣品為自來水、食用油和柴油。

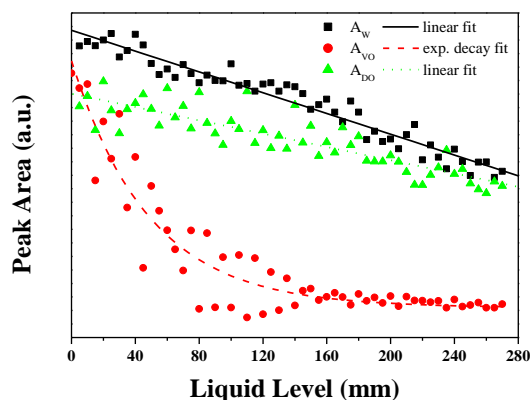


圖 10. 自來水、食用油和柴油等樣品之液面高度對訊號峰面積變化關係圖

從該圖中我們不難發現，自來水及柴油之訊號峰面積隨液面增加皆呈現線性遞減的趨勢，只不過斜率並不相同，其原因在於樣品對水的穿射率和吸收率的差異。然而食用油卻出現指數衰減的趨勢，這個結果說明樣品對此頻段之電磁波的吸收係數較柴油來得大。食用油在液面高度位於 65~145 mm 之間所產生的上下振動現象，與信號峰位置變化的情況相當接近，都是影響感測器精確度的因素，有必要針對此範圍之特性詳加討論。

圖 11 為針對食用油在液面高度在 65~145 mm 的傅利葉頻譜圖，其中緊接在液面編號“VO”後面之數值是代表該樣品之液面高度。

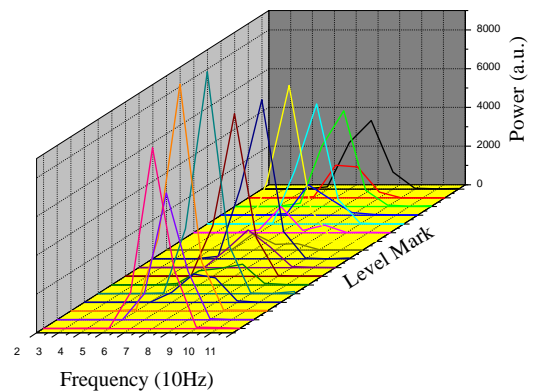


圖 11. 量測液面高度不同(65~145mm)的食用油樣品之傅利葉頻譜圖

從圖 11 中 frequency 的單位為 10Hz，顯示頻譜在 50~110 Hz 之間出現的並不僅是單一的信號峰，而是由中心頻率不同之兩個以上的信號峰組成。此信號峰反應的就是因液面和桶底介面所造成的反射波特性的。因液面高度的變化，波的行進路程差自然會跟著改變，所以兩波會有著不同的相位差。於是在此範圍內的訊號強度才會呈現出忽強忽弱的週期性變化，其中變化的週期約與偵測波之波長相當，且當峰值減弱時會出現兩個信號峰就是最佳的解釋。要清楚的辨別液面和桶底之訊號峰特性，多重高斯函數的拟合是不錯的選擇。

參考(5)式之高斯函數關係式，單一的高斯函數除了起始值 y_0 外，尚有中心頻率 x_c 、半高寬 w 和面積 A 等三個未知變量。若使用雙高斯函數的拟合將會再增加三個未知變量。為了節省拟合時間，我們須先給定部份之

變量，也就是輸入初始之邊界條件，再進行實驗頻譜的附合。根據圖 11 中編號 VO95 之頻譜圖可知，雖然從外觀中僅觀察到一個信號峰，但是仍舊假設它是由兩個信號峰所組成，結果如圖 12 之食用油樣品的傅利葉頻譜和高斯函數附合圖。

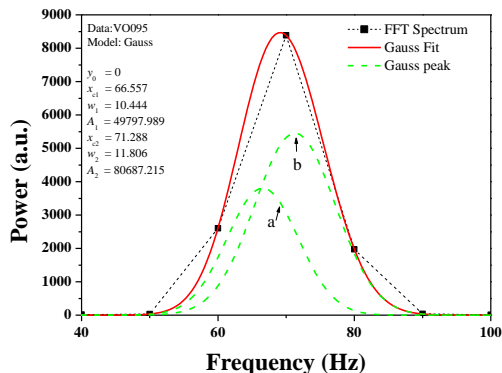


圖 12. 量測液面高度為 95 mm 之食用油的傅利葉頻譜和 Gauss 函數附合圖

因為是假設來自於液面和儲存槽桶底之反射波所組成的信號，所以設定起始條件時是先假設信號峰的半高寬不變，因此以編號“桶底”之頻譜的半高寬度作為儲存槽桶底反射之信號峰的半高寬 w_2 ；而液面的反射率也會隨樣品而保持固定，所以可以使用樣品編號為 VO250 之頻譜的面積 A 作為液面反射信號之變量 A_1 ；此外液面的高度已經決定 x_{c1} 的量值，因此變量又簡化為三個。

圖 12 中 FFT 頻譜是以方塊符號表示並以細虛線來連接，高斯函數附合曲線則是以紅色實線代表，兩條綠色虛線所繪的圖譜則是附合所得之兩個吸收峰。從符合結果可以清楚的解析出樣品 VO095 之液面和儲存槽桶底的信號峰(a和b)，相關的附合數值請參考左上角之數值。這些附合結果相當令人滿意。

五、結 論

經由上述實驗的結果，我們利用 X 頻帶之 FMCW 雷達[型號 TKNR]，獲得了液面與儲存槽桶底信號的對應關係。可以作為解析低液面或低介電常數液體之液面或介電常數之量測參考。並利用多重高斯函數進行傅利葉頻譜的附合，來分析因多重反射所造成之訊號變化，提高量測精確度。

參考文獻

- [1] Brumbi, D., “Measuring Process and Storage Tank Level with Radar Technology,” IEEE International Radar Conference, pp. 256-260, 1995.
- [2] Li, Z. and Wu, K., “On the Leakage of FMCW Radar Front-End Receiver,” IEEE Global Symposium on Millimeter Waves Conference, pp. 127-130, 2008.
- [3] Kunita, M., Sudo, M., and Mochizuki, T., “Range Measurement using Ultrasound FMCW Signals,” IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings, 2008.
- [4] Meta, A., Hoogeboom, P., and Ligthart, L. P., “Signal Processing for FMCW SAR,” IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 45, No. 11, 2007.
- [5] Hong, J. Z., Fu, K. H., and Wei, W. J., “A Chirp Transform Algorithm for Processing Squint Mode FMCW SAR Data,” IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, Vol. 4, No. 3, 2007.
- [6] Meta, A., Hoogeboom, P., and Ligthart, L. P., “Correction of the Effects Induced by the Continuous Motion in Airborne FMCW SAR,” IEEE International Radar Conference, pp. 358-365, 2006.
- [7] Laloue, A., Nallatamby, J. C., Prigent, M., Camiade, M., and Obregon, J., “An Efficient Method for Nonlinear Distortion Calculation of the AM and PM Noise Spectra of FMCW Radar Transmitters,” IEEE Transaction on Microwave Theorem and Techniques, Vol. 51, No. 8, 2003.
- [8] Weib, M. and Knochel, R., “A Novel Method of Determining the Permittivity of Liquids,” IEEE Transaction on Microwave Theorem and Techniques, Vol. 49, No. 3, 2000.
- [9] Pelyushenko, S. A., “Microwave Radiometer System for the Detection of Oil Slicks,” Spill Science & Technology Bulletin, Vol. 2, No. 4, pp. 249-254, 1995.
- [10] Bardyshev, V. I. and Gromov, Y. I., “A Resonant Acoustic Level Gauge,” Journal of Acoustical Physics, Vol. 46, No. 3, pp. 269-273, 2000.
- [11] Woods, G. S. and Maskell, D. L., “A High Accuracy Microwave Ranging System for Industrial Applications,” IEEE Transaction on Microwave Theorem and Techniques, Vol. 42, No. 4, 1993.