

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

## 調頻連續波快速精密測量關鍵技術研究 研究成果報告(精簡版)

計畫類別：個別型  
計畫編號：NSC 98-2221-E-009-047-  
執行期間：98年08月01日至99年07月31日  
執行單位：國立交通大學機械工程學系(所)

計畫主持人：成維華  
共同主持人：黃志方  
計畫參與人員：碩士班研究生-兼任助理人員：黃昱傑  
                  博士班研究生-兼任助理人員：吳秉霖  
                  博士班研究生-兼任助理人員：呂向斌

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 99年09月24日

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫結案報告

## 調頻連續波快速精密測量關鍵技術研究 Cost Efficient Solutions of Fast Measuring Techniques on a FM-CW(Frequency-Modulated Continuous Wave) Based Radar

計畫編號：98-2221-E-009-047

執行期限：98年8月1日至99年7月31日

主持人：成維華 教授 國立交通大學機械工程學系

### 一、中文摘要

調頻連續波(Frequency Modulated Continuous Wave, FMCW)原為軍用雷達技術，由於本技術具有功率低、抗干擾性強、價格低、適應性強等特點，故近幾年廣泛應用於民用量測技術上。FMCW 具備體積小、功率低及價格便宜等多項優點，適用於近距離的偵測。此方面的技術，在國外已生根多年，國內則僅有少數學校、研究機構及特殊領域的科技公司從事這方面技術的探討與研製。其重要性從 FMCW 可以廣泛運用於各種領域而不難看出。

本計畫提出一套基於快速傅利葉轉換(FFT)下，有效計算出頻率譜上峰值的斜率搜尋校正法則 Gradient search method 來校正有限長度 FFT 所計算後所產生的頻率誤差。並且將利用 MATLAB™ 計算軟體模擬，並與文獻上所提出的 Energy centrobaric method 頻率校正演算法做比較。而本計畫也利用 Microchip™ 公司所發展的 MCU 來實現所提出之校正法則，並證明其頻率誤差可校正達到 1% 的以內準確度。

**關鍵詞：**調頻連續波;訊號處理

### 二、緣由與目的

近年來現代工業產品中，以 FM-CW 原理所製成之偵測器廣泛運用於交通流量偵測、汽車防撞、水文監測等領域。由其應用在微波液位量測系統的檢測以及控制參數是扮演非常重要的角色，例如石油化學或者有毒液體上的監控與計量。由於微波液位量測系統具有低功率，高精準度和穩定性高並且是非接觸性的量測方式，因此不受液體狀態限制，液體溫度、油槽霧氣、灰塵等影響，所以非常合適應用在液位量

測監控上。

通常主要的液位量測儀器分為兩種：frequency modulated continuous wave (FMCW) radar level gauge and pulse radar level gauge. 然而 FM-CW 雷達在液位偵測上，比起脈波雷達距離分辨率更高。也因此液位量測所需精準度高的要求上，FM-CW 雷達偵測在此應用上更為廣泛。

調頻連續波雷達分為線性調頻與非線性調頻兩種，非線性調頻(例如正旋波調頻)的優點是容易實現，缺點是每個目標產生的差頻頻率並不是單一頻率，因此不能區分不同距離的目標。一般只適用於單目標場合的應用。線性調頻方式下，每個目標所產生的差頻信號是單一頻率，因此很容易區分不同距離的目標，但線性調頻方式對調頻線性度要求很高。調頻線性度將影響測距的精準度。而本計畫所採用的是鋸齒波線性調頻方式來量測物體之距離。鋸齒波線性調頻系統是發射等幅連續鋸齒波的系統，利用發射訊號和接收訊號之間的頻率差來確定系統和目標物之間的距離。一般典型 FM-CW 雷達系統如圖 1 所示。調製訊號產生器控制震盪器產生等幅連續鋸齒波訊號，經定向耦合器後直到發射天線發射，發射訊號頻率按照鋸齒波的規律變化，同時也將耦合器頻率訊號通往混頻器，做為本地訊號(LO)，再與接受天線收到的目標回波訊號進行混頻，以此獲得差頻訊號(Beat frequency)。差頻訊號中含有距離訊號，經濾波放大後由訊號處理部分處理，來獲得距離。

FM-CW 雷達測距原理，假設調變訊號產生理想鋸齒波，且不考慮都普勒頻率偏移的影響，則鋸齒波線性調頻測距系統的發射回波時間頻率曲線圖及所對應的差頻

訊號時間頻率曲線圖如圖 2 所示。

發射訊號為實線曲線 $f_t$ ，接收訊號為虛線曲線 $f_r$ 。其中初始頻率 $f_0$ 、頻率調變範圍(Frequency Deviation) $F_m$ 、掃頻重覆週期(Modulation Period) $T_m$ 和回波訊號的延遲時間 $\tau$ 。假設從天線到液面的距離可被表示為 $R$ ，其利用收到微波訊號的延遲時間可被表示成 $\tau = 2R/c$  ( $c$  為光速)。因此發射訊號頻率為：

$$f_t = f_0 + \frac{df_t}{dt}t \quad (0 \leq t < T_m)$$

回波訊號頻率為：

$$f_r = f_r(t - \tau) = f_0 + \frac{df_t}{dt}(t - \tau) \quad (\tau \leq t < T_m + \tau)$$

混頻器將發射訊號與回波訊號混頻後得到差頻訊號頻率為：

$$f_b = |f_t - f_r| = \frac{df_t}{dt}\tau$$

由於

$$\frac{df_t}{dt} = \frac{F_m}{T_m} = k$$

$$\tau = 2R/c$$

其中， $R$ 為量測物體距離，可以得到：

$$f_b = \frac{2F_m}{T_m c} R$$

因此距離方程式可寫為：

$$R = \frac{T_m c}{2F_m} f_b = \frac{f_b c}{2k}$$

從上述方程式可知，在頻率調變範圍 $F_m$ 和頻率調變週期 $T_m$ 一定的條件下，差頻 $f_b$ 與物體距離 $R$ 成正比，因此測得差頻訊號頻率即可計算出量測物體距離。故能否精準的量測差頻訊號的頻率，則為 FM-CW 雷達測距的最關鍵。

### 三、結果與討論

利用 MATLAB<sup>TM</sup>軟體進行上述 Gradient Search Method 的模擬實驗，並與文獻回顧中的重心校正法則做比較。其模擬參數為取樣頻率 14 kHz，FFT 長度 512 點，輸入 Sinusoidal 訊號，頻率為 500 Hz ~ 7k Hz 來做量測，在無雜訊環境之下，模擬兩種校正法則所運算出的頻率與實際輸入頻率誤差。如圖 3 所示。計算結果重心校正法則

精準度比例達到誤差 0.01% 以內，Gradient search method 則達到誤差 0.1% 以內。然而將模擬環境增加 white noise，其訊號雜訊比(SNR)為 15dB，並依同樣模擬參數來做運算，所得結果如圖 4 所示。Gradient search 的 RMSE 為 0.1731 Hz，而 Energy centrobaric 的 RMSE 為 0.2096 Hz。本計劃並模擬在不同 SNR 比之下，並以同樣的模擬參數來獲得量測誤差。其結果如圖 5 所示。在 SNR 低於 32dB 後 Gradient search method 校正能力上可優於重心校正法則。由此可見 Gradient search 方法在抗雜訊能力下較優越於其它方式。

然而在 MATLAB<sup>TM</sup>軟體上其運算數值精準度高並且取樣量化精準度也高於市面上現有的 ADC 量化精準度，而一般使用在 MCU 上之運算數值精準度與量化誤差皆比 MATLAB<sup>TM</sup>軟體差。因此本計劃將其數值運算精準度以 C 語言運算長度做計算，以及以 12Bits ADC 量化，並依同樣的模擬參數進行無雜訊環境模擬。所得結果如圖 6 所示。Gradient search 可校正計算頻率誤差達到 0.4% 以內，而重心比較法則可校正計算頻率誤差達到 3% 以內，則可證明在微處理機工程應用上 Gradient search method 比較合適。

FM-CW 液位量測系統在進行液位高度監控時，除了液面所反射之回波也易受其它干擾物的反射回波影響，譬如裝載溶液之液槽金屬壁回波等，導致頻移現象的發生，然而影響計算上的誤差最大的主因是干擾物體的接近量測物體的遠近以及干擾物回波的能量大小。因此在本計劃利用在峰值頻率旁 30 Hz 增加一干擾物體的反射回波，其干擾物體回波能量為物體的 0.1 倍，而模擬參數則和上述相同。結果如圖 7 所示。干擾物產生頻移的現象，導致重心比較法則產生相當大的誤差震盪範圍，而 Gradient Search Method 則還是能夠較精準的運算出頻率值。

FM-CW 液位量測雷達的訊號處理必須進行大量複雜的數位訊號處理運算，數位訊號處理器(Digital Signal Processor, DSP)是一種特別適合進行數位訊號處理的微處

理機。本計劃利用 Microchip<sup>TM</sup>公司的產品 dsPIC-16bits 微處理器來實現提出之理論。其最高運算速度是 40MIPS，和 12bits 的 Analog to Digital Converter (ADC)。因此利用先前模擬的參數應用在微處理機上，取樣頻率為 14k Hz，FFT 長度為 512 points。則會產生柵欄效應 FFT bins 為 27 Hz，所以誤差大約正負 13.5Hz 以內。而實驗方式則是利用訊號產生器產生 sinusoidal 訊號，來模擬無雜訊環境，量測的頻率範圍為 500~7k Hz，間隔 20 Hz 紀錄一次。而微處理機之訊號處理流程如圖 8 所示。其實驗的結果，Energy Centrobatic 可達到校正頻率誤差 3% 以內，而 Gradient Search 可達到校正頻率誤差 1% 以內。此結果可得知，Gradient search 的校正方式在微處理機上的應用，能得到更精準的頻率。

#### 四、計畫成果自評

在 FM-CW 液位量測系統中，利用本計劃的方式便可達到相當高的距離精準度。如需更高的精確度，便可增加 Gradient search 執行次數，但卻需要更多的執行時間，因此需要配合硬體規格的要求，來取捨其執行次數。在本計劃中，比較了 Energy Centrobatic 與 Gradient Search 兩種方法之準確度，並且比較了在有雜訊與背景干擾物時，這兩種方法之準確度。我們發現 Energy Centrobatic 在低雜訊與無背景干擾物的情況下，其準確度比 Gradient Search 方法來的好，然而，一旦加入雜訊與背景目標時，其準確度會受極大的影響而變成不可靠。在實際應用上，FMCW radar 不太可能會有無雜訊與無背景物之情況，故在應用上便無法信賴 Energy Centrobatic 所得之結果，而相形之下 Gradient Search 有著比 Energy Centrobatic 更好的抗雜訊與抗背景干擾物的能力。

本計劃也利用微處理機(MCU)來實現 Energy Centrobatic 和 Gradient Search 兩種校正方法，其模擬比較與實際量測比較之結果均相同，其誤差範圍與校正比例皆相差無幾。因此此結果是具有可靠性的。而微處理機所得之結果與 MATLAB<sup>®</sup>之模擬

結果不同之處在於”時間”的不同。因處理速度的不同所產生的。

如果結合 Energy Centrobatic 與 Gradient Search 兩種校正方法，則不失為是一個較佳的組合，先利用 Energy Centrobatic 法求得一個較接近之精確頻率，再利用 Gradient Search 求的精確之結果，如此一來，可讓 Gradient Search 搜尋之次數減少許多，也避免了 Energy Centrobatic 被雜訊與干擾物影響所造成之不準確結果。

#### 五、參考文獻

- [1] Alan V. Oppenheim, Ronald W. Schaffer, and John R. Buck, "Discrete-Time Signal Processing Second Edition," Prentice-Hall, Inc.
- [2] Chen Jian-jun, Shen Lin-yong, Qian Jin-wu, and Wu Jia-qi, "A Curve Fitting Iterative Method Based on the Curvature Data of Discrete Points," School of Mechanical and Electronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China.
- [3] John H. Mathews and Kurtis K. Fink, "Numerical Methods Using Matlab, 4<sup>th</sup> Edition, 2004," Prentice-Hall Inc.
- [4] Jin Liu, Xian-zhong Chen, and Zheng Zhang, "A novel algorithm in the FMCW microwave liquid level measuring system," Measuring and Control Department, Information Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, People's Republic of China.
- [5] Ding K and Jiang L 2001 Energy centrobatic correction method for discrete spectrum J. Vib. Eng. 14 354-8

六、附圖

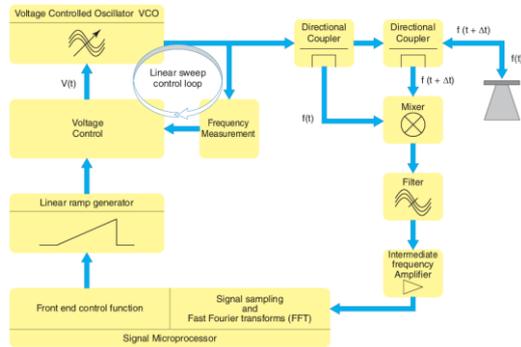


圖 1、典型 FM-CW 雷達系統方塊圖

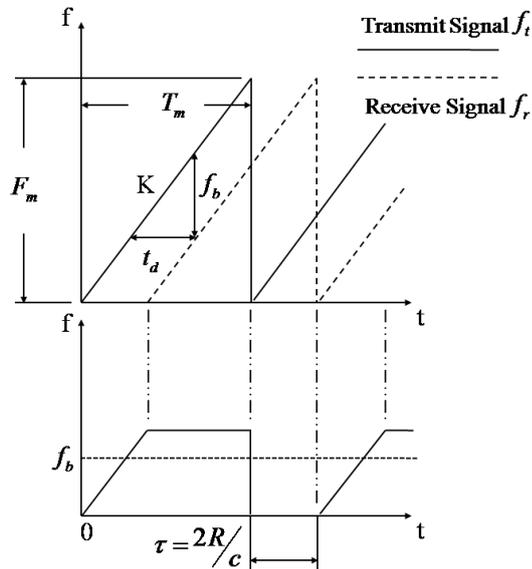


圖 2、Principle of the FMCW with Sawtooth Wave

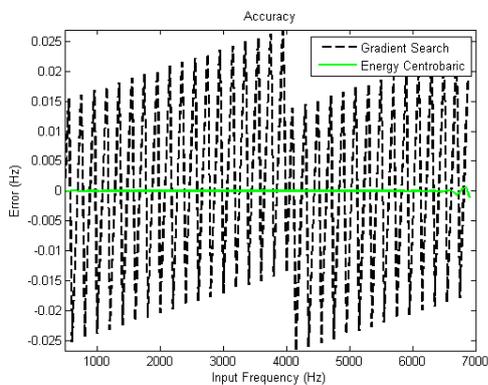


圖 3、Gradient search and Energy centrobatic 無雜訊情況下誤差比較圖。

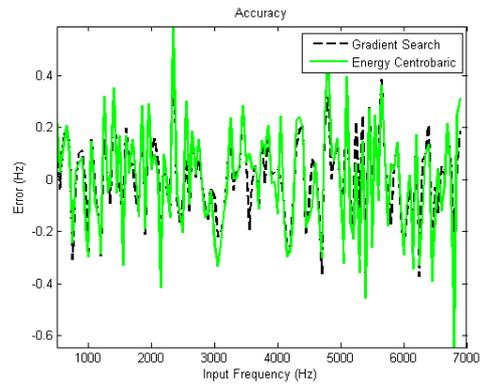


圖 4、模擬加入白雜訊 Gradient search and Energy centrobatic 誤差比較圖。

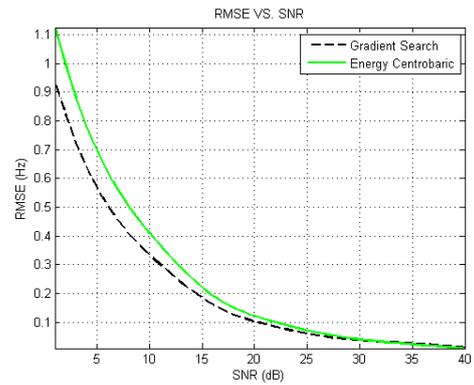


圖 5、RMSE VS.SNR 比較圖

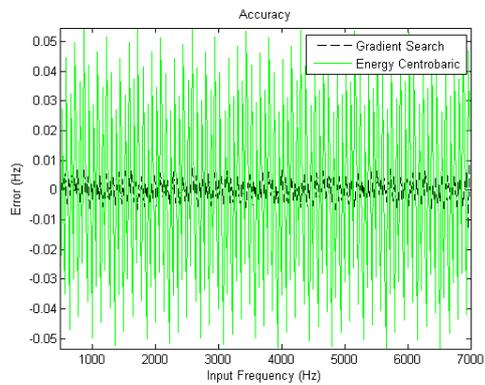


圖 6、模擬 12Bits 量化誤差及有限運算精準度誤差比較圖。

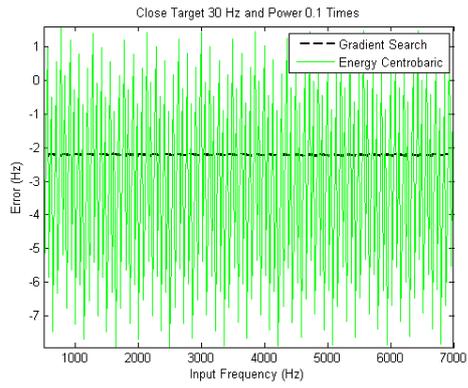


圖 7、干擾物導致頻移現象發生之模擬。

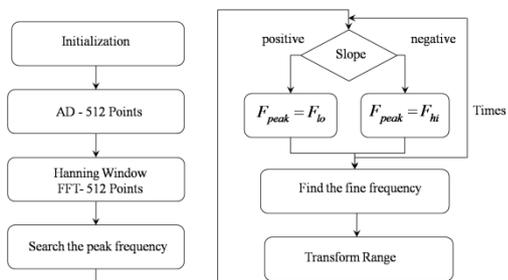


圖 8、微處理機之訊號處理流程圖

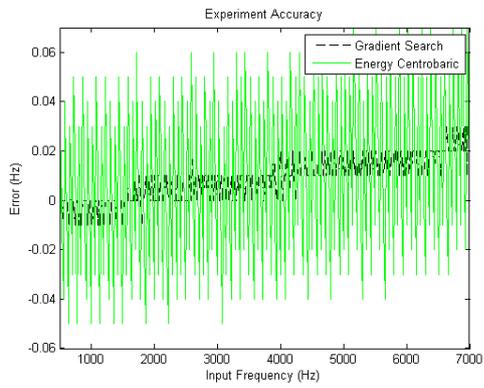


圖 9、訊號產生器之實驗誤差比較圖

無研發成果推廣資料

98 年度專題研究計畫研究成果彙整表

計畫主持人：成維華		計畫編號：98-2221-E-009-047-					
計畫名稱：調頻連續波快速精密測量關鍵技術研究							
成果項目		量化			單位	備註（質化說明：如數個計畫共同成果、成果列為該期刊之封面故事...等）	
		實際已達成數（被接受或已發表）	預期總達成數（含實際已達成數）	本計畫實際貢獻百分比			
國內	論文著作	期刊論文	0	0	100%	篇	
		研究報告/技術報告	0	0	100%		
		研討會論文	0	0	100%		
		專書	0	0	100%		
	專利	申請中件數	0	0	100%	件	
		已獲得件數	0	0	100%		
	技術移轉	件數	0	0	100%	件	
		權利金	0	0	100%	千元	
	參與計畫人力（本國籍）	碩士生	0	0	100%	人次	
		博士生	0	0	100%		
		博士後研究員	0	0	100%		
		專任助理	0	0	100%		
國外	論文著作	期刊論文	0	0	100%	篇	
		研究報告/技術報告	0	0	100%		
		研討會論文	0	0	100%		
		專書	0	0	100%		章/本
	專利	申請中件數	0	0	100%	件	
		已獲得件數	0	0	100%		
	技術移轉	件數	0	0	100%	件	
		權利金	0	0	100%	千元	
	參與計畫人力（外國籍）	碩士生	0	0	100%	人次	
		博士生	0	0	100%		
		博士後研究員	0	0	100%		
		專任助理	0	0	100%		

<p>其他成果 (無法以量化表達之成果如辦理學術活動、獲得獎項、重要國際合作、研究成果國際影響力及其他協助產業技術發展之具體效益事項等，請以文字敘述填列。)</p>	<p>無</p>
--	----------

	成果項目	量化	名稱或內容性質簡述
科 教 處 計 畫 加 填 項 目	測驗工具(含質性與量性)	0	
	課程/模組	0	
	電腦及網路系統或工具	0	
	教材	0	
	舉辦之活動/競賽	0	
	研討會/工作坊	0	
	電子報、網站	0	
	計畫成果推廣之參與(閱聽)人數	0	



# 國科會補助專題研究計畫成果報告自評表

請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況、研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）、是否適合在學術期刊發表或申請專利、主要發現或其他有關價值等，作一綜合評估。

1. 請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況作一綜合評估

達成目標

未達成目標（請說明，以 100 字為限）

實驗失敗

因故實驗中斷

其他原因

說明：

2. 研究成果在學術期刊發表或申請專利等情形：

論文： 已發表  未發表之文稿  撰寫中  無

專利： 已獲得  申請中  無

技轉： 已技轉  洽談中  無

其他：（以 100 字為限）

3. 請依學術成就、技術創新、社會影響等方面，評估研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）（以 500 字為限）

本計畫成果提供一精密的 FMCW 量測系統的雛形，對於後續相關的技術的應用可最為良好依據及典範。

此外，對於本計畫為 FMCW 所提出的演算技術，除了提高測距精度外，在演算速度上比起以往文獻有所提升，線性調頻硬體的複雜度也降低許多。實際技術應用上，除了 RF 測距之外，亦可運用在超音波以及雷射測距儀上。

本計畫是以研究 FMCW 測距技術應用，對於參與人員可獲得 FMCW 的基礎理論以及實際操作情形，為此培育 FMCW 相關技術或應用人才。對於產業界，本計畫成果可協助廠商技術突破，而不必再依賴國外技術引進，減少實業成本或避免局限發展。