

小型養殖池配置水中低頻 RFID 天線系統之磁電特性 視覺化分析與近場感應效率初估

林志遠^{1*} · 游上賢² · 陳世欽¹

¹ 行政院農業委員會水產試驗所企劃資訊組

² 工業技術研究院辨識與安全科技中心

摘要

本研究係創新應用低頻 RFID 水中無線感測技術於魚類即時動態監測系統之建置。藉由本感測系統，將可記錄與分析經 RFID 標識種魚之養殖行為。配合養殖生產履歷紀錄，可提高種魚養殖管理或水產種原庫營運之效率及精準性。本文是以 1.5 m 內徑、1 m 深約 1.8 mt 水量之小型 FRP 養殖池為測試環境。使用以 HFSS 視覺化模擬軟體進行方形低頻迴路天線之近場空間磁電場數值分析，結果發現 30 cm 邊長天線之磁場強度特性較佳，且水體對磁場之影響小。另實測分析天線 x-y 平面與電子標籤中心軸垂直時可得最大互感能量及可讀取範圍，且計算天線對電子標籤之臨界啟動電壓約為 1115 mV，其相對場強為 16.6 A/m。水中 RFID 天線系統是以 4 象限之方式以及 2 天線或 4 天線平面組合成 4 或 8 陣列天線之方式配置。以實體電子標籤現場水中計測單一邊長 30 cm 迴路天線之最大感應區域後推算至全池，結果顯示 2 種配置方式 (16 與 24 天線總數) 之各陣列天線 x-z 總平面可讀取範圍比例分別為養殖池橫斷面積之約 55% 與 85%。

關鍵字：射頻識別系統、低頻迴路天線設計、場強視覺化分析、養殖魚類即時監測

前言

近年來 RFID 系統在國內外有非常廣泛的應用，例如醫療系統中智慧型醫院的應用 (Nahas, 2007)、物流供應鏈之應用 (Weinstein, 2005; Chuang, 2005)、居家照護應用 (Booth, 2006) 等，然而不同頻段 RFID 具有相異物理特性，使用者需依應用環境尋求其適合之頻段，且其頻率範圍依照各國之通訊標準而有所不同。依我國 NCC 通信規範，目前 RFID 使用頻段可概分為超高頻 UHF (922 ~ 928 MHz)、高頻 HF (13.56 ~ 27 MHz) 及低頻 LF (125 ~ 150 KHz)。低頻 RFID 系統因為其波長較長，使其具有良好的物體穿透能力，過去研究亦顯示對於水中或非導體材料而言，在 100 KHz (LF) 時的電磁波衰減，較 1 GHz (UHF) 時約低十萬倍，

實際上可以認為沒有被吸波或衰減 (Finkenzeller, 2003)。因此，國際標準組織 (ISO) 將 RFID 於動物上的應用特別規範在低頻 (LF) 頻段，並分別針對編碼結構 (ISO 11784)、技術概論 (ISO 11785)、雙向通訊調變機制 (ISO 14223) 等加以詳細定義。

水中低頻 RFID 在魚類的應用已有多多年，國外研究方面例如鮭魚於淡水河川中之生態與成長率 (Wipfli *et al.*, 2003)、鱒魚棲地之族群評估與成長特性 (Budy *et al.*, 2003)、沿岸養殖鯊魚飼育生態 (Feldheim *et al.*, 2002)、魚塢養殖魚類的標籤植入與識別 (Mahapatra *et al.*, 2001) 等，而近年國內學者亦開始應用於日本鰻標識放流與移動分析 (黃與劉, 2008; 林等, 2009) 或養殖試驗過程中之輔助標識。但上述在水產養殖方面之應用均需再捕後離水感應讀取電子標籤 ID，無法即時偵測。

應用於水中即時監測方面，則以美國哥倫比亞河 Bonneville 水壩之應用於游經魚道之野生洄游鮭魚計量為典型，該計畫在美軍工兵團協助

*通訊作者 / 基隆市和一路 199 號; TEL: (02) 2462-2101 轉 2503; FAX: (02)2462-4627; E-mail: cylin@mail.tfrin.gov.tw

下，最初由 Nunnallee *et al.* (1998) 完成概念驗證，使用 400KHz 特殊頻率及組合式陣列天線（單一天線尺寸 2.2 m 長*0.51 m 寬*0.1 m 厚）獲得 1996 ~ 1997 年間平均 97 ~ 99% 的高讀取率結果，該系統並自 2000 年起業務化運作，至 2005 年，甚至擴充建置一長寬 4.6 m、厚 2.8 m 玻璃纖維方形天線的超大型流水通道以加強偵測 (Black, 2005)。國內部分，林等 (2009) 開始進行應用水下 RFID 系統於養殖魚類即時監測之先期概念驗證 (POC)，使用市場既有之簡易 Watron 天線與 TI 讀取器建置一模型魚道，已驗證確定水中使用低頻 RFID 傳感器之靜態感應距離遠大於高頻 (HF) 或超高頻 (UHF)，並確定對 RFID 標識游動魚體讀取之有效性，但未有進一步之最佳化天線設計與 RFID 系統匹配分析探討。

在 RFID 應用系統中，天線設計是最重要的課題，所有的訊號都要有良好的天線發送與接收之後，才能於後端進行處理。工程電磁學領域一般以 λ (波長) / 2π 值為界線來定義近場 (near field) 與遠場 (far field)，小於值 1.0 之近場是以磁場為能量來源，而大於值 1.0 之遠場是以電場為能量來源 (Inan and Inan, 1999)。因此，在 RFID 系統中頻率 30MHz 以下範圍皆為磁場式耦合 (Finkenzeller, 2003)，亦即 RFID 讀取器和電子標籤 (Tag) 之間係透過磁場產生互感，並給予電子標籤驅動之能量 (Fig. 1)。

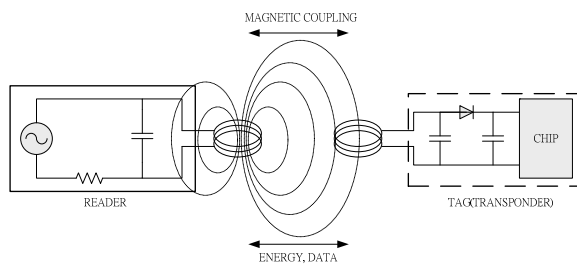


Fig. 1 The illustration of the reaction of LF-band RFID system (Redrawn from Finkenzeller, 2003).

相同原理下，魚體標識用之被動式 RFID 標籤之電能係源自於讀取器經天線發送的信號振盪，再經由逆向散射 (backscatter) 回送識別資料，因此 RFID 電子標籤本身不需要電源供電，且可更加小型化。以 RFID 應用中的天線設計而言，一般文

獻大都探討 UHF 以及 HF 頻段之天線微小化，而 LF 頻段的天線因其長波長及耦合感應之物理特性，其應用多以大型矩形或圓形迴路天線實現 (Balanis, 1997)，且利用 LF 頻段的磁場耦合特性與不易受外界干擾之物理特性，可進一步探討其結構對磁場強分布之影響及對電子標籤能量之轉換效率。

因低頻 RFID 之特殊應用性，在天線設計領域的學術研究受到較少的關注，其中 Mansap *et al.* (2006) 與 Kawdungta *et al.* (2010) 所提出的梯型雙迴路天線設計，雖然可增加天線場型所涵蓋的面積和增加平行通道式中大型哺乳動物標籤之讀取距離與讀取率，但在結構上不利魚類穿越，且因其能量輸出範圍大小會隨著兩迴路之間隙距離與梯形結構角度而有所改變，並且其天線周圍的場強較弱，造成天線設計以及在水中架設不易。而 Horler *et al.* (2005) 與 Jiang *et al.* (2007) 針對讀取器與標籤之間的磁場電感耦合特性提出理論推演，並在研究中配合 L 型匹配電路證明若 RFID 讀取器及標籤的阻抗 (電阻、電感與電容) 達到共軛匹配最佳化，則可以有最遠的讀取距離，但未探討天線結構設計對讀取距離的影響。

本研究以小型 FRP 淡水養殖池為測試環境，先以 HFSS (High Frequency Structure Simulator) 電磁場全波模擬軟體 (Full-wave Electromagnetic Field Simulation) 進行不同尺寸之天線電磁場強度分布以及天線在空氣與水中不同介質下磁場強度分布模擬後，選取最佳尺寸結構進行低頻 RFID 天線系統實際製程，再配合天線匹配模組 (tuning module) 以及 RFID 讀取器模組 (reader module) 架設整體系統，並以 RFID 標籤和感應線圈量測磁場強度分布及最大有效讀取範圍加以討論，以供後續 RFID 系統於水產養殖種魚標識即時監測之應用參考。

本文接續前人研究，應用 RFID 水中無線感測系統於連續且即時動態監測養殖種魚，針對此種養殖池中低頻 RFID 之大型天線，進行開發設計、實體驗測及配置分析等基礎性研究，以期未來實際應用時，能達到最低建置成本及最佳感測讀取效果。此種創新嘗試，對於高經濟價值的種魚而言，平時除可即時監測其活動與飼育生態外，藉由雌雄親代、取精取卵、配對等歷程紀錄，亦可

提高種原管理及繁養殖技術研發之效率及精準度。

材料與方法

一、天線電磁場強度模擬分析

為節省 RFID 天線設計實際測試時間且有效掌握元件之物理特性，本研究使用 Ansoft HFSS 軟體進行先期階段之電磁場強度模擬分析。該軟體為一電磁場全波模擬軟體，採用有限元素演算法 (FEM, Finite Element Method) 為理論基礎，並於頻域 (frequency domain) 積分求解，可分析各種射頻元件特性及天線輻射問題。過去在許多無線電天線的研究中，多使用 HFSS 軟體於輔助設計與分析複雜的結構、環境及場型，如磁性材料亞鐵鹽耦合線循環器 (circulator) 的研究 (Queck and Davis, 2004)、超寬頻天線近場的研究 (Jafari *et al.*, 2007)、微波探針分析 (Golosovshy *et al.*, 2002)、寬頻新結構的平面天線開發 (Da Costa *et al.*, 2007) 及可貼附於金屬之 RFID 天線設計 (Yu *et al.*, 2006) 等。

一般而言，低頻頻段能讀取 RFID 電子標籤的最大距離為 60 cm 以內 (Flores *et al.*, 2005)，本研究以常見台灣鯛、淡水石斑等中小型淡水魚種置於內徑 1.5 m、深 1 m 約 1.8 mt 水量之小型 FRP 淡水養殖池為測試環境，並考量天線與讀取器間匹配距離等因素，選擇以魚體易於穿越之三種邊長為 30 cm、40 cm 與 50 cm 之 134.2 KHz 低頻 RFID 讀取器方形迴路天線尺寸，使用 HFSS 模擬分析軟體先進行在不同尺寸結構、不同環境介質 (空氣及淡水兩種) 條件下之磁場 (H-field) 強度分布與衰減影響程度之探討。其中設定磁場強度分布之輻射觀察範圍為 130 cm (x) * 130 cm (y) * 80 cm (z)，邊界以外視為無限大空間而忽略之。另為求最佳模擬結果，預設讀取器天線和讀取器訊號源之間完全匹配且電子標籤相對方向垂直。HFSS 模擬比較分析結果可用以決定最後採用之迴路天線尺寸結構及進行實作，各關鍵物理環境參數設定如 Table 1 所示。

HFSS 之電場 (E-field) 模擬部分為計算迴路天線線圈之各 Phi 水平面角 (0~180 度) 在各

Theta 垂直平面角 (0~360 度) 上之電場強度 (dB) 分布，以進行干擾分析，並作為實際迴路天線於養殖池配置之重要依據。

Table 1 Key physical and environmental parameters of HFSS software for designation and simulation of LF-band RFID loop antenna

Parameter	Setting
Excitations	Lumped Port
Solution mode	Driven modal
Frequency	134.2KHz(LF)
Sweep Type	Discrete(Performs a full solution)
Convergence per pass	Maximum Delta S=0.02
Maximum number of passes	6~8
Scalar plot type	Fringe
Material	Copper
Medium	Air or Fresh Water

二、RFID 讀取器天線製作與匹配設計

考量 RFID 天線之來源、導電性能、磁場產生性能及抗氧化性能，本研究使用常見之鍍銀銅絞線，主要利用銅線圈之最終集膚效應 (skin effect)，使能量傳導時可有更高效率。另以厚度 10 mm 之聚甲基丙烯酸甲酯 (polymethyl methacrylate, 簡稱 PMMA 或壓克力) 為非金屬天線框架材料，以因應未來養殖池水中應用環境之不易腐爛、不易碎裂及避免干擾天線特性等考慮因素，最後以矽膠防水封裝。

阻抗匹配計算為 RFID 天線設計成敗之關鍵，最佳化 RFID 讀取器和天線間之阻抗匹配將使 RFID 系統有最遠之讀取距離 (Jiang *et al.*, 2007)。反之，不僅將導致訊號耗損及降低天線效益，甚至將造成訊號反饋致讀取器輸出端電路燒毀。

本研究使用德州儀器 (TI) Series 2000 RFID 讀取器模組 (RI-RFM-008)、天線匹配模組 (RI-ACC-008) 及被動式 (passive) 圓柱形玻璃封

裝 RFID 電子標籤 (RI-TRP-REHP-30) (直徑 3.85 mm、長度 23.1 mm) 進行驗測, 使用 134.2 kHz 頻段。低頻 RFID 天線為電感性, 故需以電容性阻抗進行匹配 (Finkenzeller, 2003)。依據讀取器規格表 (Texas Instruments Ltd, 2002), 當進行天線阻抗匹配時, 若天線電感值落於 10 ~ 450 μH 之間且天線品質因素 Q (Quality Factor) 值落於 30 ~ 250 之間時, 則將與讀取器達到最佳阻抗匹配, 並使天線產生最佳讀取效果, 亦即可有最大磁場分布。

Q 值由 Cheng (1989) 整理應用在傳輸線之計算公式為:

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f} = \frac{\omega L}{R} \dots\dots\dots(1)$$

其中 f_0 為中心頻率、 Δf 為 3dB 時頻寬、 ωL 為電抗儲存能量、 R 為電阻消耗功率。

式 (1) 說明 Q 值關係到天線讀取標籤的靈敏度, 其與頻寬成反比, 且為元件儲存能量與消耗能量之比。另為決定線圈直徑、線圈匝數、線圈長度, 採用 Grover (1946) 提出計算方型迴路線圈電感的公式:

$$L \approx N^2 \frac{2W\mu_0\mu_r}{\pi} \left[\ln\left(\frac{W}{a}\right) - 0.774 \right] \dots\dots\dots(2)$$

其中 L 為線圈電感值、 a 為線半徑、 N 為線圈匝數、 W 為線圈寬度、 μ_0 為導磁常數 ($4\pi \times 10^{-7}$)、 μ_r 為線材導磁係數 (銅銀均近似於 1)。

以式 (1) 與式 (2) 為參考基準並設計製作迴路天線後, 再以 HP 8753D 阻抗分析儀 (Precision Impedance Analyzer and LCR Meter) 對天線做 L (電感)、 C (電容) 及 R (電阻) 等參數量測及調整。驗測前均先校準相關儀器, 且線圈纏繞時導線已平均且緊密分布於天線架中。

三、感應線圈之製作與驗測

為克服實際 RFID 電子標籤 (實長 23.1 mm、直徑 3.85 mm) 無法獲知其晶片內部阻抗及獲得對讀取器天線之感應磁場強度輸出, 並為了解 RFID 電子標籤與天線間相對角度之感應場強立體變化, 本研究基於磁通量變化引發電場強度變化之原理及式 (2), 自行設計使用線徑 0.6 mm 之多絞線銅線, 以 45 mm 為圍繞直徑、環繞 40 圈方式,

製作高度為 40 mm 之中空圓柱形感應線圈 (Fig.2) 來模擬實體電子標籤。連接 Tektronix TDS3032B 示波器後可實測迴路天線內外部之空間能量分布情形。所量得 134.2 kHz 頻率下感應線圈與 RFID 讀取器模組天線間之磁場互感電壓, 可用法拉第定律推算感應線圈位置點之磁場強度。本文係參考 Cheng (1989) 整理後之計算公式:

$$H = \frac{1.27 \times 10^5 \times V}{f \times A \times N} \dots\dots\dots(3)$$

其中 H 為磁場強度、 V 為示波器觀測電壓、 f 為頻率、 A 為感應線圈橫斷面積、 N 為感應線圈匝數。

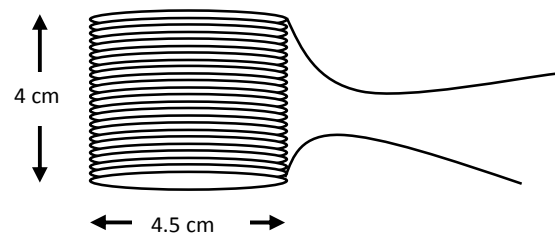


Fig. 2 Sketch of the induction coil to emulate a real RFID-tag for onsite H-field strength reading tests with LF-band RFID loop antenna. Coil tips were connected to an oscilloscope.

而 3 種感應線圈相對讀取天線之測試方式如 Fig. 3 所示。第一種方式為感應線圈中心軸平行於天線平面且為 y 軸走向, 第二種方式為感應線圈中心軸平行於天線平面且為 x 軸走向, 第三種方式為感應線圈垂直於天線平面且為 z 軸走向。轉動此三種線圈方向即可分別量測天線與感應線圈間之磁場強度。

另外, 本文亦使用實體 RFID 電子標籤於所設計製作之讀取器迴路天線內外, 直接量測其最大有效讀取範圍, 可據以計算出標籤之最小啟動磁場強度, 以進一步探討 RFID 電子標籤植入受監測魚體之方式及可能之影響。

結果與討論

一、不同尺寸結構之天線場強比較模擬分析

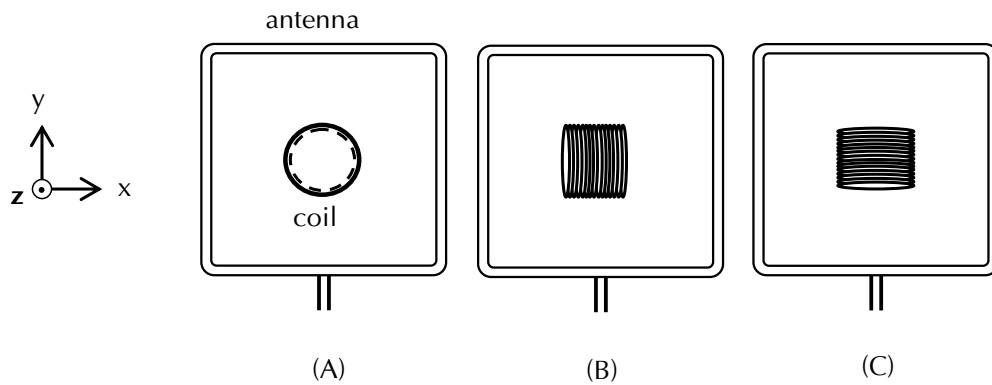


Fig. 3 Three kinds of orientations of coil related to LF-band RFID loop antenna for near-field sensing test and trigger voltage measurement. Central axis of coil was along the z-direction (A), x-direction (B) or y-direction (C) of horizontal (x-y) plane of antenna.

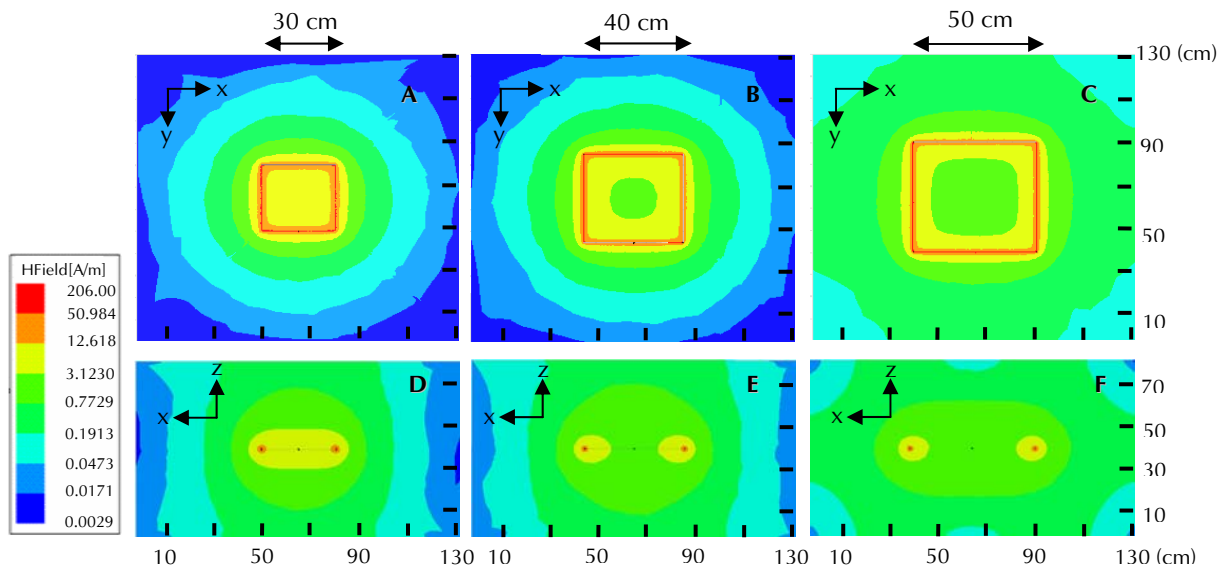


Fig. 4 Comparison of H-field strength patterns of 3 sizes and 2 planes of LF-band RFID loop antennas in condition of air by HFSS simulation. (A) and (D) showed pattern of 30 cm side-length antenna in x-y plane and x-z plane, (B) and (E) of 40 cm side-length antenna in same plane, (C) and (F) of 50 cm side-length antenna in same plane.

藉由 HFSS 視覺化圖像，可獲得低頻 RFID 天線之電磁場輻射模擬分布情形。依 Table 1 設定各項模擬參數取得磁場強度分布值後，因距天線不同位置之磁場變化極大，另將場強值取對數以便於顯示與比較。

沿天線平面 x,y 方向之空氣中磁場強度模擬上視圖分析結果之上視分布圖如 Fig. 4 所示，比較邊長 30 cm、40 cm 及 50 cm 三種方形迴路天線，可知邊長 30 cm 天線線圈內的磁場強度分布較為均勻 (Fig. 4A 圖中黃色部分，3.12~12.62 A/m)，但邊長 40 cm 天線線圈內靠近中心處，由於線圈間長度增加，導致磁場強度減弱 (Fig. 4B 中淺綠

色部分，0.77~3.12 A/m)，而邊長 50 cm 天線線圈內近中心之磁場減弱區域則更大 (Fig. 4C)。另依數據顯示 30 cm 天線磁場強度最大值为 206 A/m、40 cm 天線為 203.8 A/m，50 cm 天線為 188.3 A/m，均發生於天線近讀取器電流輸入端。

此外，比較各尺寸在天線中間切面 x,z 方向之場強側視圖部分亦發現 30 cm 迴路天線在 3.12 A/m 以上的場強範圍 (Fig. 4D 中黃色區塊) 有較穩定的能量分布，顯示線圈四個側邊不同方向的磁力線可互相重疊，在天線線圈範圍內足以提供標籤穩定的能量來源。對於邊長 40 cm 及 50 cm 迴路天線而言，天線內近中心之場強較 30 cm 天

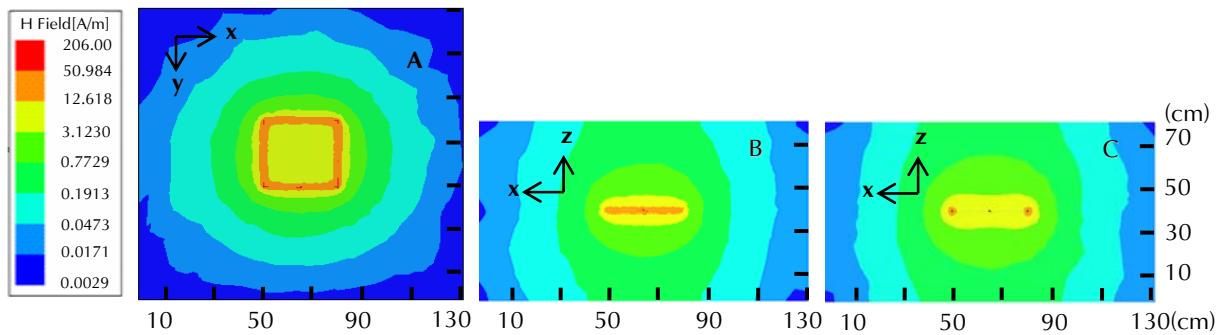


Fig. 5 Comparison of H-field strength patterns of 3 planes of 30cm side-length LF-band RFID loop antenna in condition of freshwater by HFSS simulation. (A) showed pattern in x-y plane of antenna, (B) in x-z plane on side of antenna, (C) in x-z plane crossing central point of antenna.

線之強度愈為減弱 (Fig. 4E, 4F)。

以上結果顯示在相同輸出功率與環境的情況下，隨著 RFID 天線尺寸變大，在距離線圈相同位置之天線所能供給的能量將減少，愈近中心處之場強愈弱，使得整體 RFID 標籤讀取之有效磁場範圍比例降低，亦即若中央部分之有效讀取缺口更明顯，將更不利於未來標識魚體之感應及讀取。另一方面，依據 Fig. 4 三種邊長天線之外側 3.12 ~ 12.62 A/m 高場強分布情形 (圖中黃色部分)，觀察到其由天線往外側之擴散距離大致相同，亦即不因天線尺寸變化而有差異。因此可知，對於更小型之天線而言，雖然其磁場強度與 RFID 讀取效率可能更高，但其包含天線內外側之整體可讀取範圍將更形縮小，且對觀測種魚可能形成自然游動之障礙。

依上列磁場模擬分析結果，一併考量本研究配置應用之魚池空間以及為求最佳讀取效果，本研究後續之天線實作、最佳化匹配、實際讀取器讀取測試，以及最終之天線配置分析等驗測，將選用邊長 30 cm 大小之方形迴路天線以進行之。

二、水體介質下天線場強衰減之模擬分析

為比較 RFID 天線實際應用環境下之磁場強度差異，本研究進一步改變 HFSS 模擬之介質常數為淡水 (freshwater) 型態，以觀察水中 RFID 天線磁場強度之影響及變化。沿天線平面 x,y 方向之水中磁場強度模擬上視圖如 Fig. 5A 所示，比較 Fig.4A 空氣中磁場強度分布情形，發現天線導線上磁場強度仍為最強區域，亦為向外擴散遞減，

兩者分布型態大致相同。另依觀測點取樣數值，Fig.5A 水中場強之最大值為 192 A/m，較空氣中場強 (Fig. 4A) 最大值 206 A/m 為低 (約減少 6.8%)，顯示 RFID 天線進入水中後，其場強能量雖因水體吸收稍有減弱，但影響程度不大，Finkenzeller (2003) 研究中亦表示低頻受水中環境影響小。

又檢視天線側邊切面的場強分布側視圖 (Fig. 5B) 及天線中央切面之側視圖 (Fig. 5C) 均發現天線中心 (z 方向) 磁場強度擴散距離較側邊 (x 方向) 遠，可知天線側邊 (x 方向) 隨距離之 RFID 有效讀取能力將會大幅降低。比較 Fig. 4D 可知水中與空氣中之場強分布型態仍大致相似，但水中天線中心切面部分 (z 方向) 3.12 ~ 12.62 A/m 之高場強分布 (Fig. 5C 中黃色區域) 較空氣中 (Fig. 4D) 稍有減弱。

由水中場強模擬結果得知較空氣中之磁場強度及場型並未有顯著之差異。磁場強度在天線線圈附近之能量最強，其次為線圈中心，可知當魚體標籤靠近線圈或位於線圈中心時，其能量來源穩定且標籤互感回應給 RFID 讀取器的訊號也愈明顯。而當標籤離天線線圈愈遠，磁場強度愈弱且愈不均勻，則較不易讀取標籤。

三、實測天線品質與電子標籤啟動場強

依上節模擬比較分析結果，再以式 (2) 配合 RFID 讀取器模組以鍍銀銅絞線實作邊長 30 cm、線半徑 0.7 mm、線圈匝數 4 之迴路天線，並進行外框防水封裝。另依天線匹配模組規格表進行天

線阻抗匹配，以取得天線之最大整體磁場強度。

以阻抗分析儀多次量測及調校天線組成結構後，最後選以電感值 (L) $37.854 \mu\text{H}$ 及電阻消耗功率 (R) 0.3906 代入式 (1)，可得最佳天線品質因素 Q 值約為 81，已落於表訂規格 30~250 範圍之間，可視為最佳匹配狀態 (Texas Instruments Ltd., 2002)。

邊長 30 cm RFID 天線製作及匹配完成後，以該天線平躺後之平面中心，向東西兩側各擴大 27.75 cm，向南北兩側各擴大 18.75 cm，以橫寬 85.5 cm、縱長 67.5 cm 之範圍及 4.5 cm 等間距之網格方式分別移動感應線圈 (參考 Fig. 2) 及實體 RFID 標籤，進行 18 網格乘以 14 網格共 252 網格之各網格點場強及可讀取性實測 (Fig. 6)。其中，可讀取實體 RFID 標籤瞬間回應識別碼 (ID) 之量測結果如 Fig.6 中之斜線陰影分布區域共 124 網格。相對於天線，各可讀取網格位置具對稱性，且由天線各邊框往外側均為 3 個網格距離。

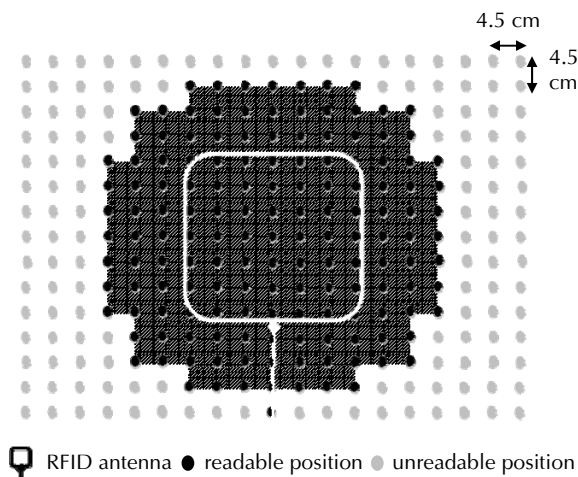


Fig. 6 A sketch graph showed the 4.5cm-interval grid positions (small solid circles) of induction coil and real RFID-tag to measure H-field strength with a LF-band RFID loop antenna (white line in central area). Black solid circles meant readable positions of RFID-tag while grey solid circles meant unreadable. All circles were the positions the coil moved on.

另將感應線圈截面積 ($1.59 \times 10^{-3} \text{ m}^2$)、線圈數 (40)、頻率 (134.2KHz) 等值代入式 (3)，並以 1 A/m 磁場強度為基準，可得感應點之場強以電壓表示為 $67.2 \text{ mV (per A/m)}$ ，此即為單位場強相對電

壓。再將前述可讀取範圍之最外圍 48 個位置點 (Fig. 6 中之深黑色點) 之各別感應線圈之示波器量測均方根 (RMS) 電壓取其平均值後可得 1114.9 mV ，除以 $67.2 \text{ mV (per A/m)}$ 單位場強相對電壓後，可得 RFID 電子標籤的最小起動場強為 16.6 A/m 。換言之，在迴路天線周邊不論其內外側位置，若該位置之磁場強度大於等於 16.6 A/m 臨界值，即可促使 RFID 電子標籤得到足夠能量，以轉換及啟動內部電路並回應 ID 識別碼。

四、感應線圈與天線相對方向之場強分析

應用低頻 RFID 系統於近場即時感測，除考慮匹配電路、天線品質因素對迴路天線最佳化設計之影響外，尚需掌握天線與標籤間，因相對方向的磁場強度變化特性，以作為後續目標魚體標識方式之依據。

實際使用示波器量測低頻感應線圈 (Fig. 2)，以上節所述 252 網格之移動方式 (參考 Fig. 6)，並依照與邊長 30 cm 迴路天線之 3 種相對方向 (Fig. 3) 下之互感電壓後，以式 (3) 反推各網格磁場強度，並以 Surfer 3D 等值線繪製分布圖如 Fig. 7 所示。圖中黃紅色代表高磁場強度、綠藍色代表低磁場強度，而白色線條為上節量測計算之最小啟動場強 (即 16.6 A/m)，低於最小啟動場強 (即電子標籤無法讀取區域) 則以灰黑色表現。

由 Fig. 7A (參照 Fig. 3A) 可知當感應線圈中心軸平行天線平面之法線 (Z) 方向時，磁場強度之分布呈現一立體方城的型態，最大磁場強度位於方型天線四個彎角處，最大值趨近於 240 A/m ，而在天線四個邊框上磁場強度亦可達 160 至 180 A/m 。天線內側之場強多大於 80 A/m 以上，約為最小啟動場強之近 5 倍之多，因此可預知以此種相對方向進入天線之電子標籤或標識魚體，將極易被偵測與讀取。而天線外側之場強亦有對稱分布之型態，然場強與距離間之幾何曲線關係減弱之程度較天線內部大。

另由 Fig. 7B (參照 Fig. 3B，感應線圈中心軸平行天線平面 X 方向) 及 Fig. 7C (參照 Fig. 3C，感應線圈中心軸平行天線平面 Y 方向)，可發現當感應線圈中心軸平行於天線平面時，磁場強度大為減弱且成為 2 分離區塊之分布型態，僅垂直於感應線圈中心軸之天線兩側邊框有感應磁場，另

兩邊框則無。此外，在有感應磁場之天線邊框，不僅其場強由低於約 90 A/m 之邊框中央向邊角減弱至約 45 A/m，往天線內外側之延伸距離亦較 Fig. 7A 短。以致不論天線內外側，均有大範圍之不可讀取區域（低於最小啟動場強 16.6 A/m）。

整體而言，Fig. 7 之結果顯示磁場強度將隨讀取器迴路天線與電子標籤間之距離加大而變小，理論上在近場每增加十倍距離，場強會減弱為距離三次方倍數之倒數（取對數約 -60 dB）（Finkenzeller, 2003），因此當標籤離天線愈遠時，可讀取率愈低。另外，感應線圈（或電子標籤）對天線之感應場強隨其與天線之相對方向，存有極大差異性。基於電磁學原理，當標籤線圈中心軸垂直讀取器迴路天線平面時（如 Fig. 7A），因天線磁力線通過標籤線圈內之數量最多，其感應磁場能量最強、可讀取範圍最大（Cheng, 1989; Finkenzeller, 2003）。反之，當標籤線圈中心軸平行於天線平面時（如 Fig. 7B, 7C），因天線磁力線通過標籤線圈之數量較少，其感應磁場能量較小、可讀取範圍也較小。

本結果可提供 RFID 電子標籤於魚體標識時之重要參考。依上述結果，電子標籤與迴路天線間之相對方向將影響電子標籤之讀取，故當決定魚體之標識方式，均須儘可能使魚體移動或游動時，其 RFID 電子標籤線圈中心軸與天線平面垂直，以達最大感應範圍與性能。

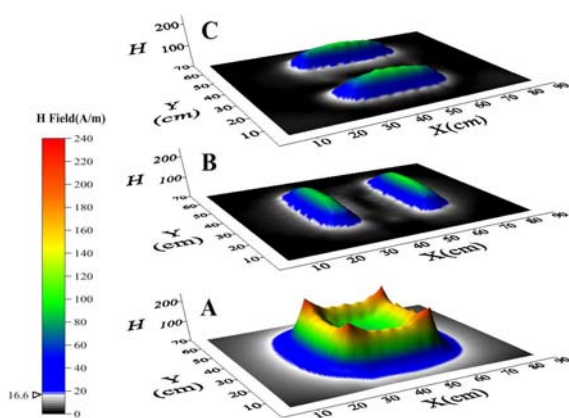


Fig. 7 3D graphs showed results of H-field strength measurement from an induction coil which moved on positioning grids (refer to Fig.6) and in 3 orientations (A: z-direction, B: x-direction and C: y-direction) related to LF-band RFID loop antenna plane (refer to Fig.3A,B,C respectively). Pure white line, marked 16.6A/m, was the trigger voltage of RFID-tag.

五、迴路天線近場內之電場模擬分析

由前述模擬與實測分析已瞭解低頻 RFID 天線與電子標籤間近場（磁場）感應之重要性。相對而言，低頻 RFID 之遠場（電場）部分，不僅無法提供標籤作動所需之能量，天線於近場所產生之電場（E-Field）反而會對鄰近天線造成電磁干擾。因此必須分析其角度干擾特性，以作為多天線配置與系統運作之參考。

Figure 8 為邊長 30 cm 迴路天線之 HFSS 水中模擬分析之電場輻射方向圖，其中各同心圓尺規代表不同大小的電場強度（單位 dB），而每一顏色之線條代表不同平面角度（phi, 0 ~ 180 度）在垂直面角度（theta, -180 ~ 180 度）範圍間之電場變化。迴路天線之 x-z 軸視角邊框線在垂直面角 90 ~ -90 度間。

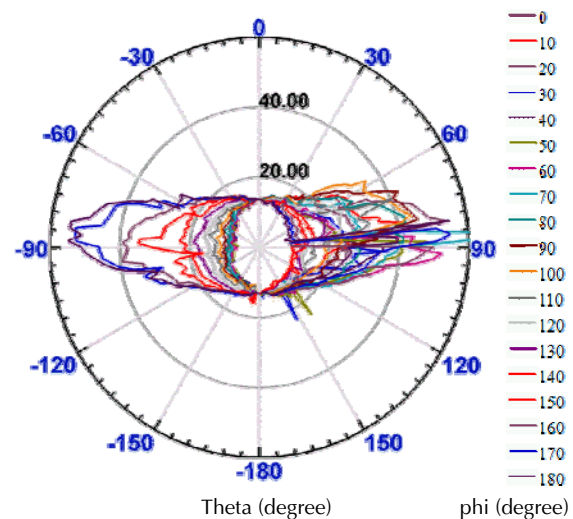


Fig. 8 E-field radiation pattern and strength (dB) of a LF-band RFID loop antenna simulated by HFSS software. Range of the phi (horizontal angle) was 0~180 degrees while theta (vertical angle) was -180~180 degrees. Antenna side was placed on the horizontal line of theta angle from -90 to 90.

模擬結果顯示近場之各角度電場輻射不對稱且不均勻，電場強度線分布多沿天線之平面方向，且在垂直面角之 60 ~ 120、-60 ~ -120 度間，其電場能量較高（20 dB 以上），另平面角之 0 ~ 10、50 ~ 100、160 ~ 180 度之能量更可高達 40 dB 以上。顯示多支天線組合下，若不採用隔離運作方式，將嚴重干擾鄰近天線之電磁場及 RFID 讀取

效能 (Texas Instruments Ltd, 2000)。

六、天線配置與整體近場感應效能量測

基於以上磁場強度比較模擬以及場強實測分析結果，已可掌握單一 30 cm 方形 RFID 讀取器迴路天線與電子標籤的感應特性。因此在實際配置 RFID 天線於內徑 1.5 m、深 1 m 的小型 FRP 淡水養殖池水中時，為能即時觀測種魚繁養殖行為，依據魚類物種游動習性及避免天線過度干擾原則下，規劃分區之陣列天線 (antenna array) 配置方式，依此方式，標識魚體之浮升、下潛或游動速度便可由電子標籤感應之天線位置加以定位區別與計算其單位時間之游動距離變化。

以四個主要感應象限為例，其上視與立體示意圖如 Fig. 9 所示。池中央架設一直徑 30 cm 之壓克力製中空圓柱 (hollow cylinder)，以方便中心底部排水與支撐陣列天線。各象限使用 2*2 平面陣列之左右緊接、上下均分空間之 30cm 方形迴路天線 4 支，全池共配置 16 支天線。其中為因應前述天線電場之周邊干擾模擬分析結果，各象限之 4 支天線係設計連接使用一電子切換器與一讀取器控制，配合控制軟體以約 200 ms 之時間間隔進行快速循環各天線通電作動及讀取 RFID 電子標籤。

在計算 RFID 天線配置後之養殖池中整體近場感應範圍之前，考量系統實際運作時之池中能量與訊號傳遞過程之雙重路徑、環境背景、水體傳導雜質、魚體游動姿勢等不確定因素，將可能與前述軟體模擬天線場強或線圈模擬電子標籤方式等分析量測結果有所不同，必須先再以 RFID 實體標籤在水中環境重新量取單一 30 cm 方形天線之最大感應範圍。

在天線 x-y 平面 (參考 Fig. 5A) 使用單一電子標籤，以天線內外隨機位置與隨意轉動角度之連續移動讀取計測方式，可量得直徑 56 cm 之圓形最大感應範圍 (以天線中央點為圓心) 約 0.25 m² (Fig. 10A)。在天線 x-z 平面之中央斷面 (參考 Fig. 5C)，以相同方式可量得長軸 56 cm、短軸 46 cm 之橢圓面最大感應範圍 (以天線中央點為橢圓中心) 約 0.20 m² (Fig. 10B)。兩者型態均與模擬結果 (Figs. 5, 6) 類似，但可感應最大距離稍有差異 (短約 2.5 cm)。

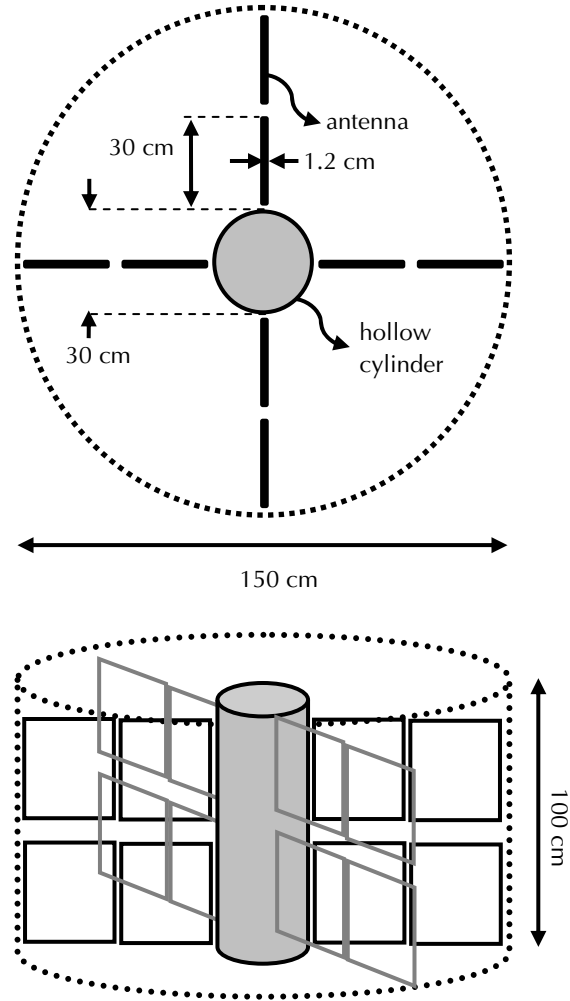


Fig. 9 The illustration showed a 4-quadrant construction example of LF-band RFID monitoring system in a FRP aquaculture tank (150 cm diameter and 100 cm depth) that using a hollow cylinder (30 cm diameter) and 4 antenna arrays, perpendicular to each other. Every single array was assembled by 2*2 square loop antennas (30 cm side-length and 1.2 cm thickness for each).

以上述單支天線於水中之 x-z 平面實際量測範圍 (Fig. 10B) 為基礎，可推算該小型養殖池以配置 4 象限陣列天線下之各陣列上層或下層天線中央斷面之 RFID 電子標籤可讀取範圍 (如 Fig. 11 俯視圖) 約為 0.97 m²，佔該斷面總面積 (1.77 m²) 之 54.96%。若為考量減低各象限之不可讀取涵蓋區域，可在各象限中 45 度角靠池邊側位置，各再加設 1*2 小陣列之同規格天線 (如 Fig. 12) 與相關之電子切換器、讀取器後，計算其可讀取涵蓋範圍之比例可提升至 85.46%，約佔 1.51 m² 之面積。依此方式，可大幅增加標識魚體之即時監測辨識

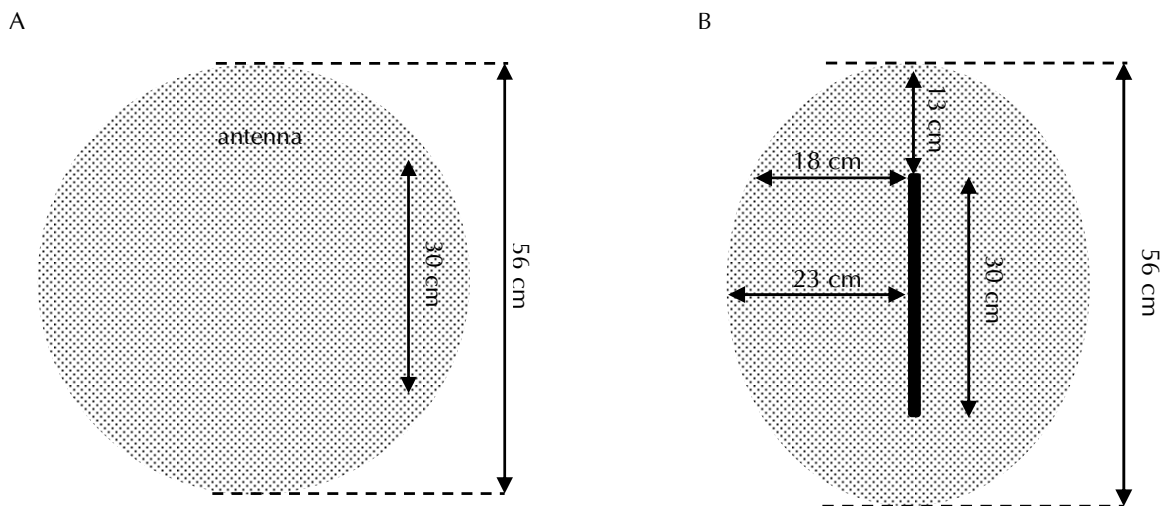


Fig. 10 Onsite measured RFID-tag readable ranges (dual-arrow thin lines) and coverage (dotted area) of a single LF-band RFID loop antenna (thick black line) in water of aquaculture tank. (A) was a top view (x-y plane) of antenna, and (B) was a side view (x-z plane) of antenna.

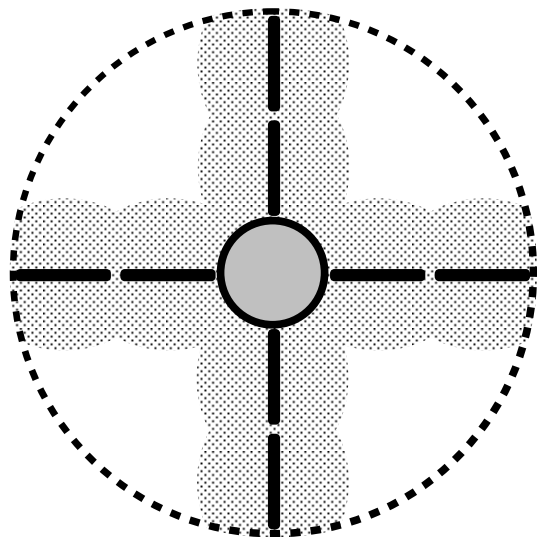


Fig. 11 The illustration showed the union RFID-tag readable coverage (tiny-dot area) based on measurement of single antenna (refer to Fig.10B). The underwater coverage of all 4 antenna arrays was about 55% of whole horizontal section (big-dot circle) from top view of the aquaculture tank.

率，但由於天線總數已達 24 支，基於實際硬體建置成本因素，對於活動力大之魚種而言，近 55% 涵蓋率之配置方式即已足夠進行監測，甚至可進一步將四個象限減為等距間隔之三個象限。因此，實際建置象限數與方式端視魚種特性而定，但需要注意每一象限仍必須以能縱斷水體之配置為原則。

結 論

任何無線電波段之應用，天線設計均為極重要之一環，而 RFID 之應用自然也不例外。其中天線 Q 值為一重要指標，可決定天線品質。當 Q 值愈高時靈敏度及讀取距離愈佳，但易受外界環境與訊號干擾；反之 Q 值愈低時其靈敏度與讀取距離較差，但讀取頻寬愈寬且不易受到外界環境干擾。而電感值會影響 Q 值，故當天線設計完成後至現場實際架設，受到環境所致而影響電感值時，可利用天線匹配器中之可調式電容阻抗，進行對天線做最佳化調整。此外，置於水中的讀取器迴路天線，Q 值將因阻抗增加而略降，加上磁場衰減的影響，實際量測可讀取範圍將比空氣中表現差，文中理論模擬或現場量測均已證實。另本研究於應用初期是以淡水環境為建置對象，對於海水環境是否因微量金屬離子物質、鹽分等影響（增加或減少）天線 Q 值及讀取效能，是未來低頻波段 RFID 系統於海水養殖魚類監測應用時需特別注意的議題。

本文各節內容已對應用即時低頻 RFID 感應系統於養殖魚類監測時，迴路天線設計之多維模擬比較、最佳化 Q 值匹配、標籤感應特性、電場干擾等實測方法，以及實際水中配置陣列迴路天線之近場感應讀取效率分布等等，提出一整體之模擬、驗測與建置之理論與實務模型。實際應用

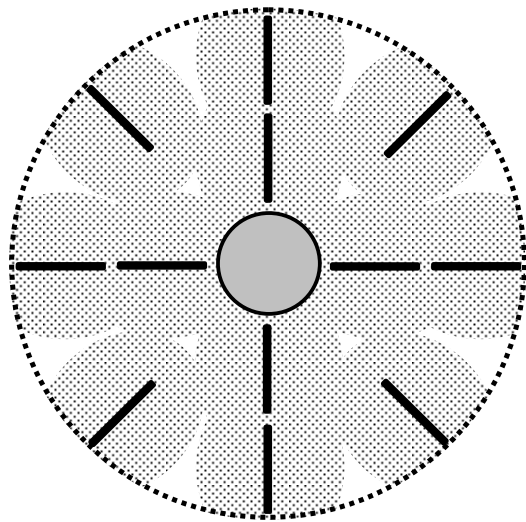


Fig. 12 Another coverage illustration showed the union RFID-tag readable area (tiny-dot area) based on measurement of single antenna (refer to Fig.10B) from different construction of RFID system. In this example, 4 additional smaller antenna arrays (contented 1*2 antennas for each array) were placed in middle position between every 2 original antenna arrays (sketched in Fig.9). The underwater coverage of all 8 antenna arrays was computed about 85% of whole horizontal section (big-dot circle) from top view of the aquaculture tank.

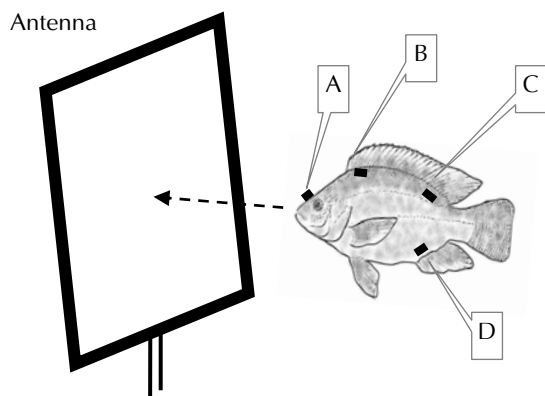


Fig. 13 An illustration showed a RFID-tagged fish passing through a loop antenna. RFID tags had been mounted on nose of fish (A), or injected into 3 positions of fish body: (B) muscle near ahead of dorsal fin, (C) muscle near rear of dorsal fin, and (D) muscle near ahead of anal fin. The central axis of (B) tag was almost the perpendicular orientation to plane of antenna and would get the largest energy from antenna (Redrawn from Lin *et al.*, 2009b).

上，若因環境不同（例如考慮養殖池形式、材質、結構、大小、水體特性等）或魚種不同（例如考慮魚體大小、游動力、游動水層、繁養殖階段等）需重新調整天線尺寸或計算場強分布、Q 值與啟動電壓、電場干擾等，以及最後之現場配置方式與量測等，均可依本文提出分析模型求解之。

未來實際運用本文 RFID 系統於種魚即時監測應用時，依林等 (2009) 於先期試驗中，已知 RFID 電子標籤植入魚體後，對於 RFID 之讀取率並未造成影響。另該作者等於魚體上之數種 RFID 電子標籤植入或掛載方式，依據本文結果可預期當魚體自然游動及穿越陣列迴路天線時，因電子標籤中心軸之方向均與天線接近垂直 (Fig. 13)，均可望獲得最高讀取涵蓋範圍及讀取率。其中前背鰭下位置因方向性最佳且標籤植入操作較為簡易及牢固，應為優先考量方式。至於實際魚體植入低頻 RFID 電子標籤後之脫落率、監測系統軟硬體架構、資料庫建置分析與即時感測之魚體行為模式 (如索餌、日夜表底層迴游、繁殖、產卵) 探討等，將另以專文論述。

謝 辭

本研究為行政院農業委員會科技計畫 (97 農科-8.1.4-水-A1) 之部分成果。本文得以順利完成，承蒙工研院辨識與安全科技中心人員協助天線製作與量測、水產試驗所淡水繁養殖研究中心黃家富副研究員提供養殖設施與各方協助、企劃資訊組蘇偉嘉先生協助資料處理繪圖，以及不具名之審查委員惠賜寶貴意見，謹此一併敬致謝忱。

參考文獻

- 林世寰、張賜鈴、飯塚義之、陳紫嫻、劉富光、蘇茂森、蘇偉成、曾萬年 (2009) 以標識放流及耳石微化學研究日本鰻的移動行為及棲地利用。水產研究, 17 (2): 47-65.
- 林志遠、高志忠、黃家富、張博光、陳世欽、劉富光 (2009) 應用水下 RFID 技術於魚類監測之先期試驗。水試專訊, 25: 18-22.
- 黃家富、劉富光 (2008) RFID 在漁業之應用與相關問題。水試專訊, 21: 45-47.
- Balanis, C. A. (1997) Antenna Theory Analysis and Design. 2nd ed., Wiley Pub. Co., 960 p.

- Black, S. (2005) Composite design selected for salmon tracking antenna. *Composites Technology*, February 2005.
- Booth, P. (2006) Application of RFID in an Integrated healthcare Environment. *Proc. 28th IEEE EMBS Annu. Int. Conf.*, 117-120.
- Budy, P., A. I. Chokhachy and G. P. Thiede (2003) Bull trout population assessment and life-history characteristics in association with habitat quality and land use in the Walla Walla River Basin: a template for recovery planning. *Annual Progress Report for 2002*.
- Cheng, D. K. (1989) *Field and Wave Electromagnetics*. 2nd edition, Addison-Wesley Pub. Co., 717 p.
- Chuang, M. L. (2005) How RFID will impact supply chain networks. *IEEE Int. Eng. Manage. Conf.*, 1: 231-235.
- Da Costa, K. Q., V. Dmitriev, D. C. Nascimento and J. C. da S. Lacava (2007) Broadband L-probe fed patch antenna combined with passive loop elements. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 6: 100-102.
- Feldheim, K. A., S. H. Gruber, and M. V. Ashley. (2002) The breeding biology of lemon sharks at a tropical nursery lagoon. *Proc. R. Soc. Lond. B.*, 269: 1655-1661.
- Finkenzeller, K. (2003) *RFID Handbook: Radio-Frequency Identification Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards and Identification*. 2nd ed., Wiley Pub. Co., 446 p.
- Flores, J., S. Srikant, B. Sareen and A. Vagga (2005) Performance of RFID tags in near and far field. *IEEE Int. Conf. Personal Wireless Commun.*, 353-357.
- Golosovshy, M., E. Maniv, D. Davidov and A. Frenkel (2002) Near-field of a scanning aperture microwave probe: A 3-D finite element analysis. *IEEE Trans. Instrument. Measure.*, 51(5): 1090-1096.
- Grover, F. W. (1946) *Inductance Calculations: Working Formulas and Tables*. D. Van Nostrand Pub. Co., 312 p.
- Horler, G. D., S. J. Hindle and D. McGorman (2005) Inductively coupled telemetry and actuation. *The IEE Seminar on Telemetry and Telematics*, 5/1-5/6.
- Inan, U. S. and A. S. Inan (1999) *Engineering Electromagnetics*. Addison-Wesley Pub. Co., 800 p.
- Jafari, H. M., M. J. Deen, S. Hranilovic and N. K. Nikolova (2007) A Study of Ultrawideband Antennas for Near-Field Imaging. *IEEE Trans. Antennas and Propagation*. 55 (4): 1184-1188.
- Jiang, B., J. R. Smith, M. Philipose, S. Roy, K. Sundara-Rajan and A. V. Mamishev (2007) Energy Scavenging for Inductively Coupled Passive RFID Systems. *IEEE Trans. Instrument. Measure.*, 56 (1) : 118-125.
- Kawdungta, S., C. Phongcharoenpanich, and D. Torrungrueng (2010) Design of a novel dual-loop gate antenna for radio frequency identification (RFID) systems at low frequency band. *Prog. Electromagnetics Res. C*, 12: 1-14.
- Mahapatra, K. D., B. Gjerde, P. V. G. K. Reddy, M. Sahoo, R. K. Jana, J. N. Saha, and M. Rye. (2001) Tagging: on the use of passive integrated transponder (PIT) tags for the identification of fish. *Aquacul. Res.*, 32: 47-50.
- Mansap, C., P. Wouchoum, C. Phongcharoenpanich and D. Torrungrueng (2006) Trapezoidal Dual Loop Antenna for RFID system at Low Frequency. *Proc. Asia-Pacific Microwave Conf.*, 1478-1481.
- Nahas, H. A. (2007) RFID applications in smart hospitals. *IEEE Int. I Sym. Computer-Based Med. Sys.*, 337-342.
- Nunnallee, E. P., E. F. Prentice, B. F. Jonasson and W. Patten (1998) Evaluation of a flat-plate PIT tag interrogation system at Bonneville Dam. *Aquacul. Eng.*, 17: 261-272.
- Queck, C. K. and L. E. Davis (2004) Novel Folding Technique for Planar Ferrite-Coupled-Line Circulators. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 52 (5): 1369-1374.
- Texas Instruments Ltd (2000) *Tag-it™ Antenna Design Notes Version 0.7*, 37 p.
- Texas Instruments Ltd (2002) *Series 2000 Reader System, Reference Guide*, 42 p.
- Weinstein, R. (2005) RFID: A technical overview and its application to the enterprise. *IEEE J., IT Prof.*, 7 (3): 27-33.
- Wipfli, M. S., J. P. Hudson, J. P. Caoette and D. T. Chaloner (2003) Marine subsidies in freshwater ecosystems: salmon carcasses increase growth rates of stream-resident salmonids. *Trans. Am. Fish. Soc.*, 132: 371-381.
- Yu, B., S. J. Kim, B. Jung, F. J. Harackiewicz, M. J. Park and B. Lee (2006) Balanced RFID tag antenna mountable on metallic plates. *IEEE Antennas Propagation Soc. Int. Sym.*, 3237-3240.

Visualization Analysis of Magnitude-electric Characteristics and Preliminary Evaluation of Near-field Response Efficiency of Underwater Low-frequency RFID Antenna System in a Small Aquaculture Tank

Chi-Yuan Lin^{1*}, Shang-Hsien You² and Shih-Chin Chen¹

¹Planning and Information Division, Fisheries Research Institute

²Identification and Security Technology Center, Industrial Technology Research Institute

ABSTRACT

This paper proposes a new approach to construct a real-time monitoring system of aquaculture fish based on an underwater wireless sensing technique of low-frequency (LF) RFID. Behavior of tagged fish in aquaculture tanks can then be identified dynamically. With the culture and breeding traceability data, efficiency and precision of broodfish management or running an aquatic genetic resource bank can be improved. The testing and proofing facility is a small-size FRP fish tank with 1.5 m diameter and 1 m depth inside. HFSS, a visualization simulation software, was used to numerically analyze the H-field and E-field strength distributions in near-field space of square LF loop antenna in the first place. Result showed character of magnetic field of 30 cm size-length antenna was better than other sizes and less impact of H-field strength in fresh water. Real object testing result showed perpendicular angle, between x-y plane of antenna and center axis of RFID-tag, would reach the largest interactive energy and readable coverage. Critical trigger voltage of emulative coil of RFID-tag was measured to be 1115 mv against the antenna while the calculated H-field strength was 16.6 A/m. Underwater RFID antenna system in the fish tank was constructed by combinative ways of 4-quadrant and antenna arrays (4 or 8 arrays used, 2 or 4 antennas for each array). A single LF loop antenna was measured its RFID-tag related maximum readable ranges onsite in water and in great detail. Thus, the whole readable area crossing x-z plane of each kind of antenna arrays, totally 16 or 24 antennas, could then be calculated to be about 55% or 85% of the horizontal circle plane of the tank, respectively.

Key words: RFID, designation of low-frequency loop antenna, visualization analysis of field-strength, real-time monitoring of aquaculture fish

*Correspondence: Planning and Information Division, Fisheries Research Institute, Keelung 202, Taiwan. TEL: (02) 2462-2101 ext. 2503; FAX: (02) 2462-4627; E-mail: cylin@mail.tfrin.gov.tw