

類比電子學實務期末專題

組別 第七組

R09921129 電機碩二 黃意堯

B10202031 物理二 陳庠宇

專題： 2 維超聲波相控陣列雷達

專題緣由與目標 Why

人們透過感知察覺外在訊息，藉此與世界有所互動。得以判斷周遭並做出抉擇是人們執行動作的基本要素，隨著文明的進展，人們有了更多的需求與渴望去達成原先自身能力不可及的任務。擴展人們的行為能力之時，同時也會社會帶來不少福祉。

而在現今生活中，運用機器人執行任務逐漸成為社會的趨勢，無論是出沒於日常一隅的智能清潔機，危險的災難現場，抑或是遙遠的太空探勘時，皆有他們的身影。當今機器人的感測技術具有發展的潛力，同時其高昂的價格是否匹配其實際性能，令我們相當感到好奇。在修習類比電子學實務課程時，學習到相關的知識，於是好奇能否以逆向工程的方式了解其感測原理，嘗試自製空間感測器。

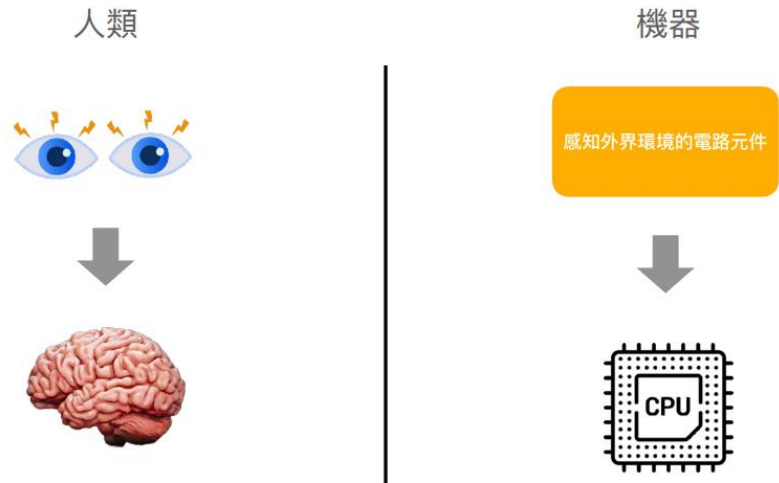
根據聯合國 17 項之永續發展目標(SDGs)，我們期許在產業創新與基礎設施有所貢獻，透過機器提供精準的感測能力並分析空間，以輔助人們進行舉凡是具風險之救難任務，安全監控、自動駕駛，抑或是影像判斷等行為。



圖一 聯合國 17 項之永續發展目標

專題實施構想 How

為達成上述目標，機器須具備精準的感測能力。當機器需要接收並分析連續性之外在訊號時，我們聯想到可以應用類比電路在此專案上。



圖二 利用電路元件感知外在資訊與分析之示意圖

我們預計使用多個訊號發收子來偵測空間資訊，因此將使用 IC 元件控制訊號傳輸；同時，藉由放大器放大接收訊號，以及過濾背景雜訊，以提升實測結果的精確性。

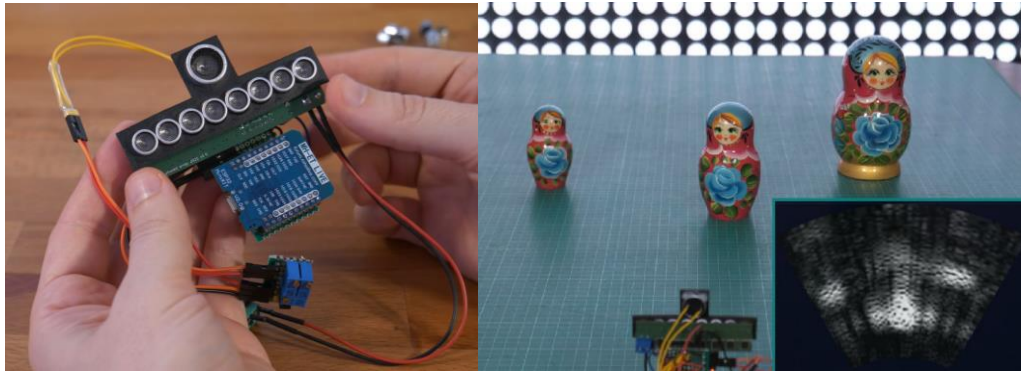


圖三 推論機器感知外在資訊之模型示意圖

專題實行 What

Motivation

因為看到一個介紹實作的酷影片: DIY sonar scanner¹



圖四 DIY sonar scanner 影片中的成品

在感測這個領域中，雷達已是一個成熟的技術，尤其現今無人駕駛的領域逐年興起，常見的偵測方法像是毫米波雷達、相機、光達等，透過方位的改變抑或是旋轉即可達成 3 維的掃描或影像錄製。然而當雷達面(或任何發射接收子)有自由度上的受限時，我們希望透過相位陣列的方式達成各種角度上的偵測。

¹ DIY sonar sensor <https://www.youtube.com/watch?v=z4uxC7ISd-c>

專題的目標

在這個專題，我們想自製 2 維的相控陣列超聲波雷達，希望能在物理層面上成像出水波干涉的波型演化，應用面目標是達成大廣角的測距與空間量測。

若時間允許的話，我們會把這個想法推廣至三維空間建模，透過增加更多收發子以及幾何排列，讓空間感測更有視覺化。

專案特色

選用 **Phased array**，有別於傳統機械掃描，透過電腦控制移相器來改變波的相位，其優點在於快速掃描出空間資訊，改善機械掃描慣性大、目標容納有限等略勢；而當相控雷達的陣列數夠多時，可以採並聯形式運作，具有多功處理與高可靠性。

在收發訊號上，我們選用**超聲波**。考量到物件檢測的環境適應能力，例如煙霧造成環境的不透明度等等，超聲波適合用於以上條件；另一考量為可行性與專案成本，本專案一開始的發想是參考光達(lidar)，然而光達的成本過高，單價將近 200 萬台幣以上，顯然不是這份專題的目標。於是尋找類似的模型，我們發現超聲波收發子是一種易於取得，價錢相對光達極為便宜的原件，考量專題的可行性，我們將先以超聲波作為空間感測的原型。

² credit: 由組員 黃意堯 使用 KiCAD 軟體，參考 註1 影片資料繪製

軟體方面: 處理相位疊加，目前以現有開源連結³做發想並進行改良。

從選擇訊號的接收/發射源開始，考量要偵測的目標是空間，我們預計先製作原型測試其可行性，找出操作上的問題並加以改良。當電路設計完善後，我們將往程式(相位處理)以及空間偵測視覺化等方向努力，最後把軟硬體整合，完成本次的專題。

執行專案地點 Where

台大物理系凝態館 R207 電子學實驗室

台大電機系博理館 maker 創作室

天文數學館 11F 討論室

³ Phased array source code reference <https://github.com/bitluni/SonarScannerV1>

時程規劃 When

周數	目標	分工規劃
第零周(11/11-11/18)	繪製電路圖、1D 超聲波測距組裝	黃: 參考影片繪製電路圖 陳: 尋找適合材料
第一周(11/25)	測試零件，參考電路圖組裝電路；熟悉軟體與模擬程式	黃: 測試 1D 接收器模型；送洗電路板 陳: 組裝、焊接零件；熟悉 Arduino syntax
第二周(12/02)	優化電路圖，收發子陣列探討；實測並評估可行性	黃: 測試 2D 接收器模型可行性；相控測試 陳: 收發子幾何陣列測試
第三周(12/09) 專題半成品展示周	展示可運作之模型初版； 優化相位控制程式；蒐集模型問題	黃、陳: 實測 2D 模型測距，雜訊消除評估成效。討論模型問題。
第四周(12/16) 期末緩衝周	檢視成品實測成效；討論與改進	(黃: DEBUG 程式問題) (陳: 3D 模型測試)
第五、六周(12/23-12/30)	精進成品；專案發表	黃、陳: 延伸 3D 模型測距。相位處理精進。

經費規劃

專案預計使用之耗材與器具	所需數量	預計金額(元)
超聲波收發子(40kHz)	50 組 (包含測試過程 與成品組裝)	25(元/個) *50
MAX232	1*10	62(元/10 個)
LM324	1*10	38(元/10 個)
BC557 PNP	1*10	16(元/10 個)
100k resistor	3*10	使用電子實驗室元件
10k resistor	3*10	使用電子實驗室元件
100R resistor	3*10	使用電子實驗室元件
100nF capacitor	5*10	使用電子實驗室元件
5k potentiometer	3*10	使用電子實驗室元件
Arduino nano 開發板	2 組	250(元/個) *2
PCB 電路板送洗	10 組* 3 版改良	200(總送洗費用)

專案所需預算：2000 元 (購買器材)

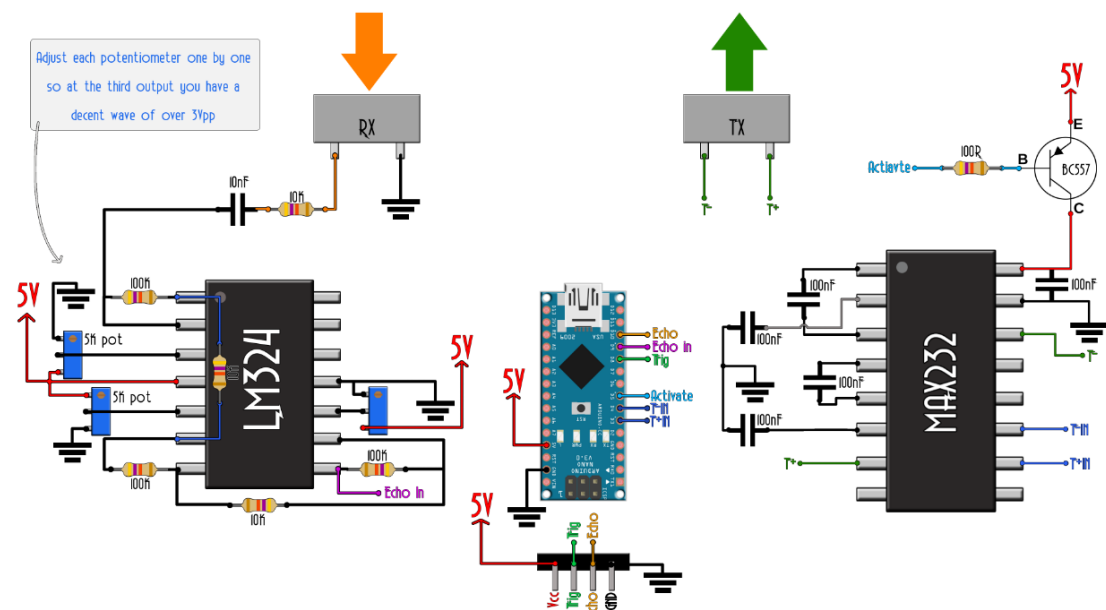
註：電子元件皆為自行焊接，電路板送大陸廠洗刻

專題總支出: 2310 元 (額外支出為 IC 原件焊接費 & nano 3m 傳輸線)

執行過程與成果說明

一維雷達測距儀

在專題中，我們選用超聲波作為雷達訊號的頻段，為此我們研究了超聲波感測器的原理(以 arduino 的超聲波測距儀作為研究對象)。首先以逆向工程的方式了解該套件所運用的 IC 原件相關原理(例如接收訊號的放大、提高輸入電壓使 arduino 微處理器得以運作等等)

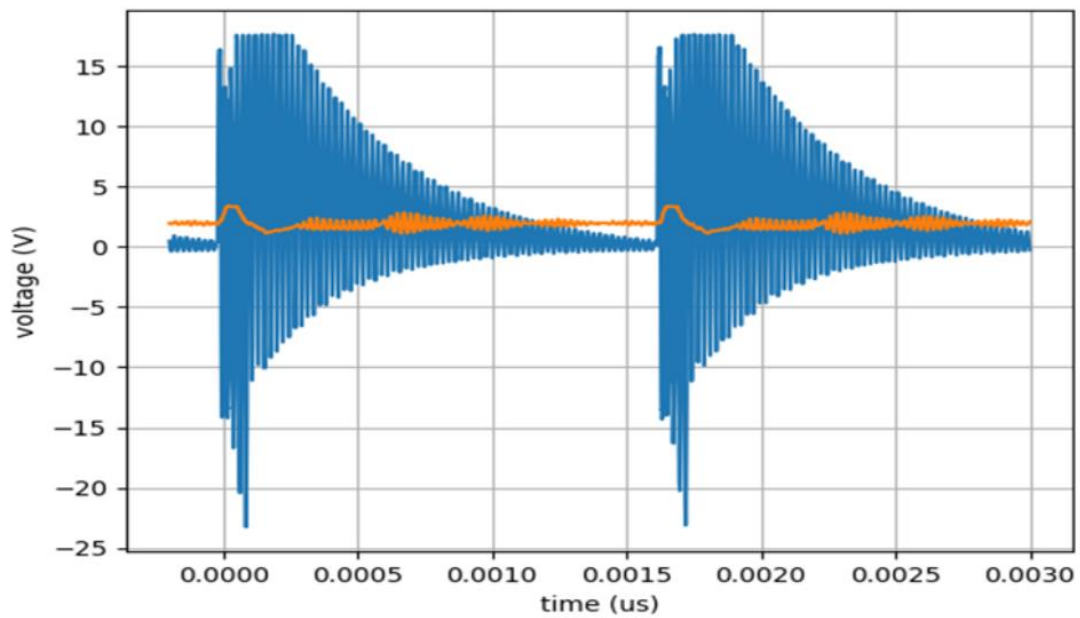


圖六 測距儀套件電路圖分析

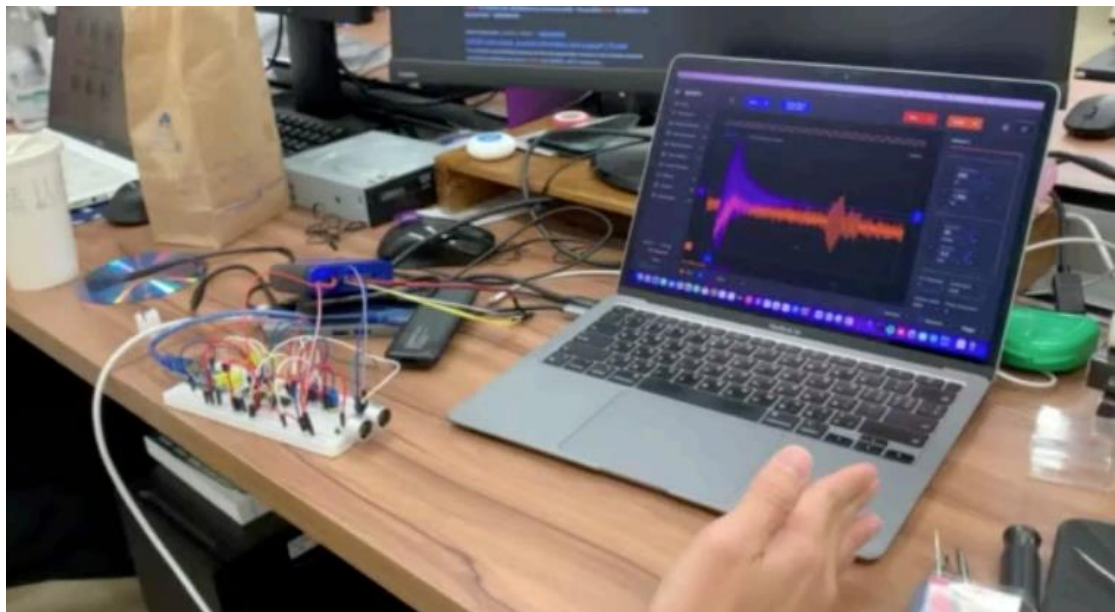
操作過程遭遇之困難 & 成果小結

由於所參考的模型為測距儀的部分功能，故需修改開源程式使輸出端可以打出

8 個連續方波；同時在電路中可變電阻需做適當的調控。起初所遭遇的問題多半在熟悉電路架設與 IC 原件功能，解決後即可達成第一代的 1 維超聲波測距儀，經測試後得有效測量距離極限約為 25m。如圖七所示：



圖七 實測測距儀輸入端與輸出端訊號

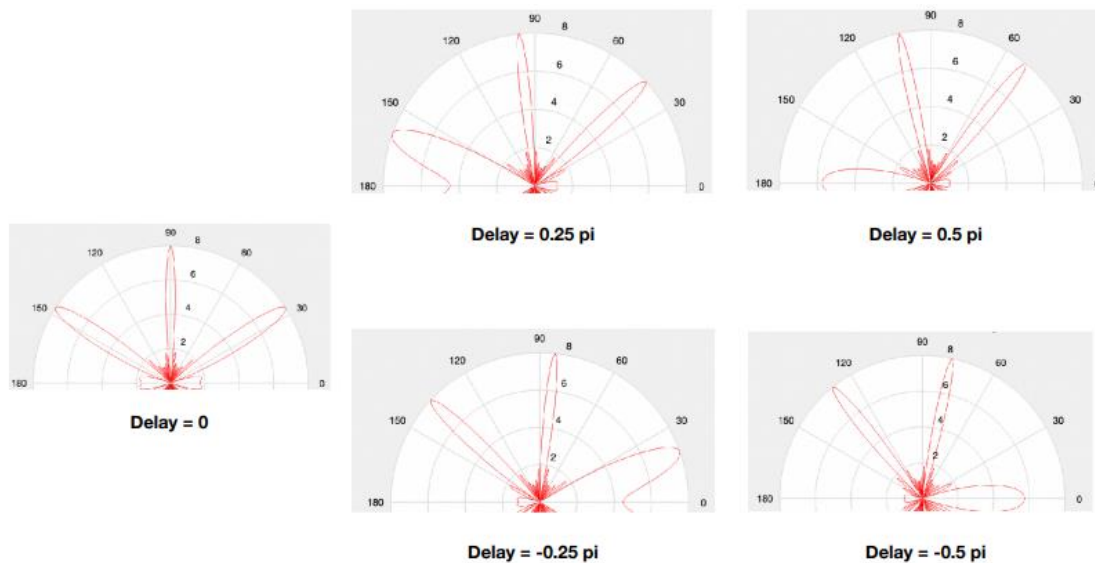


圖八 實測測距儀輸入端與輸出端訊號示意圖

在第二代的測距儀中，我們希望能使接收訊號放大至與輸出訊號達同一個量級，於是以放大器(LM324)進行放大；實驗發現放大過程中也會將雜訊同時放大，以至於訊號埋藏在雜訊之中不易辨別。由類比電子學實務的上課經驗，聯想到可以用濾波器來去除雜訊，然而課程提及的低通濾波、bandpass filter 不足以過濾雜訊；經查詢發現 bandpass filter 有多種的變型，嘗試幾種後發現 multiple-feedback-band-pass filter 得以消除大部分的雜訊。處理完訊號放大與雜訊消除後，我們將在 1 維的探索經驗運用在 2 維相控雷達上。

2 維超聲波相控雷達

Phased array 要處理的問題是 beam forming。參照自行設計的電路圖(圖五)，使用 matlab 進行模擬:



圖九 以 matlab 進行相控雷達陣列之 beam forming 模擬

操作過程遭遇之困難 & 成果小結

得到模擬結果後，嘗試進行實測。遇到的第一個問題是 ic 原件腳位過小，不易焊接，最後請仲耘助教協助後才解決。在改版後使用 tc78h621fng driver ic 取代了 max232，成功減少了 driver ic 的使用(前者可一次支援兩個 output)。

成功焊接雷達後，卻發現無法做到 beam forming 的效果，經修改程式碼也沒有太大改善；後來發現是收發子的間距過大，根據理想值收發子的間距應是超聲波波長的一半左右(約 8 mm)，然而第一代的模型間距約 2cm，於是更換較小尺寸的收發子並加入雜訊濾波器，重新設計電路。

後續遇到的困難主要為程式操控，以及解決儀器特性的受限下的相關問題。其中發現執行 arduino code 會有 delay 的情形，而延遲會影響高頻電路的實測結果。最終成功以視覺化介面讀取 2D 成像，並具有測距 30m，約 60 度的有效量測角。



圖十 使用 Arduino & processing 視覺化介面軟體顯示 2D 相控雷達成像操作過程

示意圖

成果討論與未來展望

反思與改進

本專案在硬體方面已有明確執行的方向，唯在軟體方面需要投入時間研究相位控制的演算法，在六周的時間內執行上有一定的挑戰性。在專題進行前蒐集同學們的意見後，像是超聲波感測器易受到環境因素影響，有同學也分享自身經驗，提點需要注意收發子的靈敏度和雜訊處理；以及專題的目標需要更具體且更有可行性等。

隨著課程演進，我們發現可以應用更多課堂上提過的知識來精進我們的硬體，像是嘗試加入 band pass filter 收取超聲波頻段。重新討論這個專題的設定目標後，我們先使硬體有可行性後，再著手多個接收器的相位處理。目前的模型尚可運作，唯在收發子的幾何(縮小收發子間距)與排列、訊號傳輸原理，以及更進一步的演算法優化等等屬於日後延伸的目標。

展望

就目前的 2 維相控雷達而言，以符合並超出當初專題的預設目標：使相控雷達具有測量空間的能力，並提供視覺化的影像。日後將嘗試把自製相控雷達安裝在自走車上，使其能運用其偵測能力執行任務。

同學與業師的想法回饋

同學 A：以視覺化的方式呈現提案理念，相當容易接受與理解。

同學 B：報告時使用流程圖介紹，並有語調的起伏變化，吸引到聽者的注意。

同學 C：想把昂貴的儀器用設計上的巧思達到相差不遠的效果的解決方案，結合了最近熱門的雷達影像辨識的話題，我認為很有淺力。但考慮到執行的難度，我認為程式以及演算法上的設計應該是蠻有挑戰性的因為要進行多個感測器的數據結合，去查雜訊並進行某些細部的強化及修正。期待看到成果!

同學 D：我覺得專案有挑戰性，而且有說明未來在生活上的應用非常好。雷達陣列中，相同規格元件的互相干擾也要考慮一下，可能才會更完善。

前電子學助教：很精簡的在 5 分鐘內講到重點，很喜歡略提原理但不細講，而是著重在最後的 demo 呈現上，並做出了令人驚奇的展示結果。

Fusion 共同創辦人& Gogoro 電池部門工程師 Q&A

看起來這個專題遇到比較大的困難點會在處理訊號相位等程式問題，你們的規劃與設定目標是什麼呢？

回答：先以成功接收訊號為主，做出超聲波空間感測原型為這堂類比電子學專題的目標；若有餘力再多鑽研程式優化的部分。

建議：聽到你們在焊接 IC 原件時遇到困難，其實你們送洗 PCB 時可以直接下單請他們代工焊接，就可以省去這個問題了。

課程心得感想

(物理二 庠宇)我認為這是上大學後，最受震撼也是收穫最多的一堂課。也許過了一陣子後，便會慢慢忘記老師與助教曾經教授的電子學原理，但我想那些在課堂上不斷強調的關鍵字：小訊號放大，被動元件、阻抗匹配、頻率響應等等，大概是永牢腦海中了。很喜歡老師的教學理念，向我們傳達”人與事爭”，多與人互動，”培養解決問題的能力，要有耐心 debug”，”真實的問題是跨領域的”。同時老師提點大家要多關懷世界的周遭變化，才能懂得靜下來思考自己的目標，這幾點是我在這堂課收穫到最多的，也改變了我以往的學習方式。這堂課的形式很自由，讓我感受到老師與助教的職責不過是分享這些有趣的知識給我們，剩下的則是留給自己去探索，實作；於是讓我意識到學習動機的重

要性，以往即使是系上的必修課，卻總留在被動學習的狀態，在這堂課每周總是有精彩的實驗與助教的酷分享，也因此會想投入時間鑽研有興趣的主題。此外，這堂課也讓我重新省視了物理的學習，老師提及的幾個關鍵字，其實在物理，甚至是拓展的不同領域上，往往都有一定的關連性，有種原來都是這些基本的道理在運行，知識而不是只停留在特定科目而已，而是跨領域的，也因此很喜歡老師出的開眼界作業(雖然寫作業很累)。最後感謝辛苦且總是給予我許多啟發的仲耘助教，讓我在這堂課中收穫甚多。

Reference

Phased array https://en.wikipedia.org/wiki/Phased_array

Phased array simulator

<https://www.shadertoy.com/view/NdXfDl>

Demi, L. Practical Guide to Ultrasound Beam Forming

<https://www.mdpi.com/2076-3417/8/9/1544>

Hackaday Supercon - HunterScott : Why Phased Arrays are Cool and

How to Build One

<https://www.youtube.com/watch?v=ytBmoL2wZLw&t=0s>

Band pass filter https://www.electronics-tutorials.ws/filter/filter_4.html

Homemade sonar sensor part list

http://electronoobs.com/eng_arduino_tut36_parts1.php