行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

子計劃四:智慧型天線系統之即時化運算平台設計及實現研 究(I)

<u>計畫類別:</u>整合型計畫 <u>計畫編號:</u>NSC91-2219-E-009-021-<u>執行期間:</u>91年08月01日至92年07月31日 <u>執行單位:</u>國立交通大學電機與控制工程學系

<u>計畫主持人:</u>胡竹生

報告類型: 完整報告

處理方式:本計畫可公開查詢

中 華 民 國 92 年 11 月 27 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

子計劃四:智慧型天線系統之即時化運算平台設計及實現研究(I)

計畫編號:NSC 910801-920731 執行期限:91 年 8 月 1 日至 92 年 7 月 31 日 主持人: 胡竹生 國立交通大學電機與控制工程學系 計畫參與人員:鍾青衛、張家瑋 國立交通大學電機與控制工程學系

一、中文摘要

本計畫是針對上鏈(Uplink)智慧型天線接收 機的實現,需要使用到達角度估測(DOA)理論與 波束形成(Beamforming)演算法,因為所需計算量 龐大,因此構建多數位訊號處理器的實驗平台, 為了有效的分散運算量,研究在多顆數位訊號處 理器之間、個人電腦與數位訊號處理器之間,溝 通與資料快速傳遞之方法。計畫中,在數位訊號 處理器上應用矩陣運算即時實現 MUSIC、 ESPRIT 及 MVDR 演算法,對採樣到的實際訊號 作演算法的驗證,並對演算法作個別的效能評估 且適當的分配演算法的運算量到多顆數位訊號 處理器上,即時實現智慧型天線接收機的功能。

二、緣由與目的

智慧型天線系統的主要概念為,利用前端陣 列天線的接收裝置,來取得發射信號的空間特徵 (Spatial Signature),藉由空間特徵的差異及信號 之到達方向(DOA),正確地由收取到的多根天 線訊號資料中,取出我們所想要的信號,排出不 想要的訊號及雜訊,達到減少同頻干擾的效應和 多重路徑傳輸所造成的信號衰落現象,以增加系 統用戶的容量和改善通訊品質等優點。計畫中的 研究重點大致上可分為兩個部分:1.硬體平台: 硬體實驗平台是以三顆數位訊號處理器所建構 成的,可透過 PCI 匯流排直接與 PC 做存取溝通 2.陣列天線演算法實現與評估:軟體部分研究的 重點在於 DOA 與 beamforming 演算法實現,透 過效能分析,希望將演算法所需的運算量適當的 分散到多顆數位訊號處理器上。

三、結果與討論

1. 陣列訊號處理

陣列訊號處理是利用數根天線排成特定的 形狀,接收來自空間中傳遞的訊號,進行訊號處 理之後達到空間濾波(Spatial Filter)的機制。如 果所需的訊號和雜訊在頻譜上極相似,使用一般 時域性濾波器並不能把訊號和雜訊分開,這時可 以利用訊號和雜訊在空間中傳遞路徑不同的特 性,藉著空間濾波器來分離出訊號和雜訊,提高 其訊雜比(SNR),以達到更好的通訊效能;相 對地,利用空間濾波,亦可以排除空間中不需要 的雜訊或達到僅單純接收某方向之訊號。本章節 在實現空間濾波器包含兩個步驟:1.利用一組陣 列天線持續接收同一組訊號來源,依據訊號到達 天線時間不同之性質,利用到達角度(Direction of Arrival,DOA)理論,解出相對於陣列天線的訊 號來源方向,計畫中實現的演算法有 MUSIC 與 ESPRIT。2.解出訊號來源方向之後,接著利用 波束形成(Beamforming)理論完成空間濾波,計畫 中實現 MVDR 演算法。

2. 數值方法實現矩陣運算

MUSIC 與 ESPRIT 兩個演算法中都必須要 計算出相關矩陣(Correlation Matrix),而且也都必 須要作特徵相量分解;MVDR 在計算權值的時候 必須要用到反置矩陣,在這一章節會討論所有使 用到的矩陣特性與數值方法

2.1 Hermitian Matrix 的特性

在 MUSIC 與 ESPRTI 中所計算出來的相關 矩陣會是一個 Hermitian matrix,所以在這小節介 紹 Hermitian matrix 的特性[4][5][6]。如果 $A \in C^{n \times n}$ 是 Hermitian matrix 則數學式表示成 $A^{H} = A$,擁有以下的特性:

- \succ A 一定存在 n 個線性獨立的特徵向量。
- ➤ 所有的特徵值都會是實數。
- ▶ 不同特徵值所對應的特徵向量彼此之間會互相正交。
- ▶ 任何的 Hermitian matrix A ∈ C^{n×n} 都可以作特 徵向量分解。
- 如果 Hermitian matrix A 不是一個非奇異 (Nonsingular)矩陣且特徵值都不等於零的 話,則A的反置矩陣可表示成:

$$A^{-1} = [E\Lambda E^{H}]^{-1} = (E^{H})^{-1}\Lambda^{-1}E^{-1} = E\Lambda^{-1}E^{H}$$
$$= \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{\lambda_{i}} e_{i}e_{i}^{H}$$
(3.1)

2.2 特徵值分解 (Eigenvalue Decomposition)

特徵值問題在科學與工程的領域常常會遭 遇到,特徵值在分析數值方法是很有用的,例如 在解代數方程式時分析疊代(Iterative)的收斂性 或是在解差分方程式作穩定性分析上。一般在解 對稱矩陣 A 的特徵值必須經過三個步驟:

- 1. A 先利用 Householder transformation 化簡成 tridiagonal matrix T。
- 2. 對 tridiagonal matrix T 解特徵值,利用 A 特徵 值與T 特徵值相同的特性。
- A 的特徵向量利用 back transformation 透過T 的特徵向量計算出來。
- 2.3 Householder transformation

Householder 演算法可以把 $n \times n$ 的對稱矩陣 A 透過n-2次的正交轉換(Orthogonal Transformation)化簡成 tridiagonal matrix [5][6]:

			-				
	a_{11}	a_{12}	0	0	0	L	0
	a_{21}	<i>a</i> ₂₂	a_{23}	0	0	0	0
	0	a_{32}	<i>a</i> ₃₃	a_{43}	0	0	0
tridiagonal matrix =	0	0	a_{43}	0	0	0	0
-	0	0	0	0	0	0	0
	М	0	0	0	0	$a_{(n-1)(n-1)}$	$a_{(n-1)n}$
	0	0	L	L	L	$a_{n(n-1)}$	a_{nn}

每一次轉換可以消減該對應的行或列的元素, Householder 建議使用的對稱轉換矩陣 P 可 定義成方程式(3.2):

 $P = I - 2ww^{T}$ 且 $|w|^{2} = 1$ (3.2) 2.4 解對稱矩陣特徵值

在數值分析的文獻[5][6]中,有研究指出對稱 的矩陣轉換成 tridiagonal 的形式,在計算特徵值 或特徵相量會加快收斂速度,與疊代(Iteration) 的次數,所以原先對稱的矩陣經過 Householder transformation 之後即可以獲得 tridiagonal matrix。針對 tridiagonal matrix 解特徵值的方法有 許多種,例如 Characteristic polynomial、Jacobi method、QR iteration,各適用於不同的情況,在 計畫中所採用的方法是 QR iteration,使用之前, 必須先說明 QR 分解的方法,要實現 QR 分解-樣有許多方法, Givens rotations、Gram-Schmidt orthogonalization、之前介紹的 Householder transformation 也可應用在 QR 分解上,因為 Gram-Schmidt orthogonalization 可在任意的矩陣 作 QR 分解,並且程式容易實現加上分解速度也 快,所以在計畫中採用此方法來實現 QR 分解。 2.5 Back Transformation

最原先矩陣 A 的特徵值在 3.2.2 小節利用 QR iteration 已經計算出來, back transformation 則是用來求 A 的特徵向量[8],可將 A 分解成由特 徵向量與特徵值來組成:

$$A = (P_2 P_3 \sqcup P_{n-2})(Q_1 Q_2 \sqcup Q_k) \Lambda (Q_1 Q_2 \sqcup Q_k)^T (P_2 P_3 \sqcup P_{n-2})^T$$
(3.3)

 $= (P_2 P_3 \sqcup P_{n-2})(Q_1 Q_2 \sqcup Q_k) \Lambda \left[(Q_k Q_{k-1} \sqcup Q_1)(P_{n-2} P_{n-1} \sqcup P_2) \right]^T$

3. 實驗平台

本實驗平台主要是由兩塊實驗模版所組成 的 — DM11與 DP12-2C。實驗平台上包括三顆 德州儀器公司(TI)所製造之 TMS320C6701 浮點 (Floating Point)處理器,主要特色在於提供高速 運算需求,並以浮點運算架構,達到高精確度的 計算;另外還有一顆 Xilinx Virtrx FPGA 用來解

前端資料埠(Front Panel Data Port, FPDP)所傳進 來的資料。以 DM11 及 DP12-2C 所結合之多 DSP 之 PCI 板為主要運算單元,稱為多 DSP 架構 (Multi-DSP Architecture)[14]。這樣的設計是為了 實現硬體多工(Hardware Multitasking)的想法,所 謂多工即多工作任務,把要執行的工作,分成許 多個不同的子段分配到不同顆的 DSP 上去處 理,如果切割的適當,且子段之間彼此的工作是 獨立的 , 就有可能達到三顆 DSP 可同時平行運 算的效果,這樣的作法不僅可以將運算量適當地 分散在多個處理器上,也可以讓單一處理器擁有 單純地計算環境,並提高運算速度。在兩塊板子 的組合上,利用 IEEE 1386 PMC(PCI Mezzanine Card)標準,作為結合的連接埠,DP12為主端, 提供DM11在PCI匯流排上的訊號連接及電源供 應,最後將連接到 Host 端的 PCI Bridge。但是這 樣的設計在穩定度的測試上,仍須要加以改良, 才可以達到穩定的高速傳送,另外 DM11 上的 DSP 並不能同時看到 DP12-2C 上的兩顆 DSPs, 這樣傳輸的方式就被限制住了,這是必須要解決 的問題,所以在這個章節提出改良並已經實現的 架構。



圖 3. 多 DSP 建構於 PCI 匯流排架構圖[14]

3.1 多通道串列傳輸埠 (McBSP)

每顆TMS320C6701中都擁有兩對高速串聯 埠界面可以作全雙工(Full-Duplex)之串聯通信, 它們擁有雙緩衝器(Double-Buffered),可以透過 直接記憶體存取(DMA)或處理器作資料雙向存 取;McBSP 可以直接連接各種通信介面標準, 並可支援最高達128 通道之多通道傳輸模式; McBSP內部可提供取樣信號產生器,可程式化產 生本身所需的時脈訊號與同步訊號。多個時脈與 訊號框同步訊號接腳,則可使McBSP使用或輸出 供外部使用外部提供之時脈與訊號框同步訊 號;另外它們也可以程式設定作信號的壓縮 (Compress)與伸展(Expand),包括 μ-Law 及 A-Law 兩種模式。

3.2 直接記憶體存取 (Direct Memory Access)

TMS320C6701 DMA控制器共有四個獨立 的通道與一個連接HPI的輔助通道,可以被設定 在不同的傳輸模式。DMA控制器可傳送資料從 一個映射記憶體位址到另外一個,不需要DSP介入控制;DMA可在背景程式中執行傳送資料到內部記憶體、外部記憶體、或週邊界面,同時讓DSP繼續執行程式,增加執行效率。

3.3 即時資料交換 (Real-Time Data Exchange)

即時資料交換(RTDX)是德州儀器公司所發展的一套技術,目的是 DSP 應用程式可繼續執行的情況下,要讓 DSP 端能夠與主機端的應用程式進行即時連續雙向的溝通。本系統在設計時撰寫了 Matlab 的 GUI(Graphical User Interface)界面,如圖4,搭配 RTDX 使用。



圖 4. Matlab GUI 界面

3.4 即時模擬環境建立

6000 系列的 DSP,都具備兩個 McBSP 的輸 出入埠,實驗平台上的三顆 DSPs 彼此之間可利 用 McBSP 之間作高速資料的傳遞,在穩定度方 面比 PCI 界面可靠,搭配 RTDX 之後就可與主機 端聯繫,形成一套可即時模擬驗證演算法正確性 與可行性的平台,如圖 5 之架構。



4. 實驗結果與效能評估

4.1 功能驗證

使用 Channel Sounder[15]實際量測空間的訊 號傳入實驗平台做演算,並利用 Channel Sounder 內建的分析軟體做比對,以確認結果的正確性。 量測資料參數的設定為 8 個天線數目, 取樣個數 50, 訊號參數為 4, 估測空間中有 4 個訊號, 訊 號來源的角度分別為[-18 2 20 45]。

print and sharehold a figure to the state of	
ORTHNM: 0	
Bouros aceber = 4	
OTART FODOIT	
Protect Doctors	
11-4 18-18	
QRINEM: 0	
EIGCOM: 0	
Valre(11=0.554051 .Varie(11==0.823483	
Vales [2]s-0.606382 Varia[2]s0.794979	
Malan 101-0 470205 Wanted 01-0 000110	
Autus[2]an'd'(1)22 *Autus[2]an'd00110	
[Valra[4]=0.993663 .Varxs[4]=0.107943	
Number=1 angle=-17.989096	
Rusher=2 angle=45.024555	
Domberry's englants 070585	
and a second second and a second second	
bompetes updimetiziono	
End ESPEIT	
14 + [+ [+ [+ [+]], that], that and [
TAR WE DED	The Rep, press \$1.

圖 6. DSP 計算 ESPRIT 的結果

ESPRIT 的結果是角度值,圖 6 中的 Number 是第幾個訊號來源, angle 表示是該對應訊號來 源的角度,其中角度的精確度可到小數點以下六 位。



圖 7. DSP 計算 MUSIC 的結果



圖 8. DSP 計算 MVDR 的結果

圖 7 是 MUSIC spectrum;由圖 6 與圖 7 可 驗證 MUSIC 與 ESPRIT 演算法的功能是正確 的。作完角度估測之後,接著利用已知訊號來源 的角度帶入波束形成理論計算出權值,計畫中採 用的波束形成理論的演算法是 MVDR。MVDR 對付 interference 的效果比較顯著,圖 8 是波束形 成器對向不同的訊號來源角度所形成的 beampattern 畫出。

4.2 效能評估

針對 ESPRIT、MUSIC、MVDR 演算法分別 利用程式執行時間分析的功能來找出各個演算 法在 DSP 上需執行多少個指令數、假設一個指 令週期為 10ns 執行一次完整的程式約需要多少 時間、找出執行時會花最多時間的程式段落。

heres.	14.50	Lating	Laise.	lal Basi	I foi Bassi.	This safe	Bellini.	(biller)	Hellin.	bi me
- 100 Add-10					1.1.1	11/11		1.1.1		1.1.1.1.1
- 9 - 10	10	1048	1040	10-01	1245	1248	LINHS.	189-02	10HB	185-00
of stilling		264-86	118-12	105-00	19948	(348)	154-85	3848	116-16	10-16
the full water	178	10-81	LONG.	116-01	145-8	185-85	121-03	276-bi	10+0	12-01
0.0000.004	178	104.00	148-81	345-81	146-01	345-81	1540	128-04	124-34	10.00
- A Mileni	108	10-10	10140	110-01	104-0	129-81	10+0	124-04	18-01	105-01
9400	16	104-88	1948	19481	1948	116-01	1848	104.00	18-8	10-00
and and a second	18	135-34	LONG:	125-36	10-5	105-00	121402	1.5-0	105-01	105-00
- interest	14	104-30	1946	135-00	146-17	10-16	(BAR)	105-0	144-0	128-00
and a state	114	1040	128-82	128-91	12548	129-82	12HB	121400	12-01	125-80
a det	18	30-8	1346	10.85	176407	16-31	1040	1048	TIME	145-31
A DECKE	100	101-00	12148	10-00	121-0	101-00	101-02	185-01	192-07	1040
of the live	16.	1648	13ME	10-81	146-67	126.00	1 Evill	1048	14440	12-16
a share	10.11	104-00	TEME.	10-80	TEMP.	104-00	12:48	122-00	126-07	10.00

圖 11. 執行一次 ESPRIT 的時間

由程式執行時間分析的結果得知同樣針對 4.1 小節產生的模擬訊號執行一次 ESPRIT 約需 17ms 比 MUSIC 的 43ms 快, MUSIC 所耗費的時 間內約 85%是在 search spectral; MVDR 得到的 效能分析, 是針對四個到達角度計算出四組不同 的權值, 全部的執行時間約 17ms。

- 25		1.000	The level	hi he	34 844	The Page	16.446	doctions.	Intering.	fori Bal-	100.00
27	9	41	1 March	184.00	1744	134444	104.00	100-00	110,00	116-00	104.01
	Girm -	201	1,964(8)	0441	10445	10440	1000 82	105-00	105.65	100000	100.0
	game.		1.00-101	12(+4)	10440	110440	100-01	122-03	100.00	12010	1.0+1
	- Contract.	54	1 March	110481	1004-001	110481	1010-01	125-22	125-10	1048	125-83
8.	Q Martin	28	ale al	129-01	104-02	10/HH	28-82	1.85-98	106-00	128-94	105-02
1	- 9 point	100	ALC: NOT	120-22	114407	100405	144.01	104-00	104-04	1044	1644
	With a statute of		3948	125-88	1004	12240	125.64	189-00	106-04	128-18	129-6
	9.000	191	1.000-000	4.764.84	100408	10440	100-00	1.856-88	124-04	122-08	166.0
	No. of Concession, Name		1/6+01	104.04	200408	169-01	105.48	115-43	108-04	106-00	16-6
	of the lot		1.00+001	1040	28498	10640	100-00	100-00	105-04	106-00	[46+16]
	- 4 deci		UNLAW.	15.48	10448	149-47	105-00	105-00	10.84	115446	1648
	Queri .		100-07	129-04	105+94	104-01	1075-00	125-07	218-04	105-10-	105-1
L.	A net		Also Miles	10.00	12144-00	175-88	100.40	Titledd	174-00	17hill	10.15
1	COLUMN PROF										- 6
1	the States I'm	1.781	1	-1.1							
			Independent						10 Miles		

圖 12 執行一次 MVDR 的時間

四. 結論

本計畫的目標分為兩部分,一部份是硬體平 台資料傳輸的改良,另一部份是陣列天線演算法 的實現。目前在硬體平台資料傳輸方面,三顆 DSP之間已經可以互相傳遞資料,DSP也可透過 RTDX 界面直接與在 PC 端的 Matlab server 作溝 通,同時也可利用計畫中實現的 GUI 界面在不需 要停止 DSP 運算的情況下,可以即時觀察到 DSP 的運算結果;陣列天線演算法部分,計畫中在 DOA 演算法方面實現了 MUSIC 與 ESPRIT,針 對實際訊號作測試可正確的解出訊號的到達角 度,在 DSP 上的執行時間只需要幾十個毫秒左 右,ESPRIT 比 MUSIC 運算速度較快,所以建議 需要使用 DOA 演算法時,可採用 ESPRIT;計畫 中實現了 MVDR beamforming 的演算法,計算出 四個到達角度的權值只需要 17ms, 可適用於在 發射端移動的情形。現在本實驗平台可以直接被 PC端的 Matlab 分析軟體拿取到正在 DSP 中運算 的資料與計算結果在 Matlab 中分析或繪圖,而 且並不需要將正在運算中的 DSP 停止,這樣的 架構方便於以後在實驗平台上演算法的驗證。實 驗平台經過測試可以與其他支援 McBSP 界面的 平台作連接,大大地提升系統的擴充性,未來資 料不一定要從前端匯流排送進實驗平台,也可以 從其他任何支援 McBSP 界面的平台將訊號或資 料,送入多顆 DSP 中將資料作重複且大量的計 算,並且可與其他平台整合成一套更完整的系 統,專職的發揮出數位訊號處理器的特性。

參考文獻

[1] R. O. Schmidt, "Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation", IEEE Trans. Antennas and Propag., vol. AP-34, no. 3, pp.276-280, March 1986

[2] Roy, R.; Kailath, T., "ESPRIT-estimation of signal parameters via rotational invariance techniques", Acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE Transactions on , Vol: 37 Issue: 7 ,July 1989.

[3]B.D.Van Veen and K.M.Buckley,"Beamforming: A Versatile Approach to Spatial Filtering," IEEE ASSP Magazine,pp.4-24, April 1988

[4] Ta-Sung Lee, Array Signal Processing, (class note).

[5] J.H. Wilkinson, " The Algebraic Eigenvalue Problem ", Oxford, 1988

[6]Michael T. Heath, "Scientific Computing : An Introductory Survey", McGraw-Hill, 1997

[7]William H. Press, Saul A. Teukolsky, William T. Vetterling, Brian P. Flannery, "Numerical Recipes in C : The Art of Scientific Computing Second Edition, "Cambridge, 1992

[8] H.T. Lau.," A Numerical Library in C for Scientists and Engineers," Boca Raton, CRC Press, 1995

[9] "DM11 Hardware Reference," AG Electronics Ltd, UK.

[10] "DP12 Hardware Reference," AG Electronics Ltd, UK.

[11] "TMS320C6000 Peripherals Reference Guide", Texas Instruments.

[12]"TMS320C6000 Chip Support Library API User's Guide", Texas Instruments

[13]" TMS320C67x DSP Library Programmer's Reference Guide", Texas Instruments

[14] 林家銘, "以數位訊號處理器為架構之智慧型天線接收 機雛形實現," 交大碩士論文, 2002.

[15] Thoma, R.S.; Hampicke, D.; Richter, A.; Sommerkorn, G.; Schneider, A.; Trautwein, U.; Wirnitzer, W. "Identification of time-variant directional mobile radio channels," Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on , Vol: 49 Issue: 2 , April 2000.