

衛星影像分析近岸波場之探討

林鴻鵬¹ 董東璟² 莊士賢³ 高家俊⁴

摘要

衛星遙測具有廣域涵蓋的特性，為從事海洋波浪觀測之重要工具之一。本文探討應用 SAR 影像於分析波場之適用條件及所受之限制。發現當衛星影像灰度值分佈分散，或波浪前進方向與衛星飛行方向趨於同向時，由 SAR 影像分析所得之主波長、波向與實測值之差異較大，甚至該影像無法分析。考慮人類活動及海事工程大都於近岸海域實施，本文進一步將 SAR 影像應用於分析近岸波場，探討造成近岸波場實測值與影像推估值差異的原因，經本文討論得知近岸海域水深變化大，空間波場分佈不均，是造成衛星影像之波場特徵值與單點實測值產生差異的原因之一。

Some Notes on the Nearshore Wave Field Analysis Using SAR Images

Hong-Peng Lin¹ Dong Jiing Doong² Laurence Z.H. Chuang³ Chia Chuen Kao⁴

ABSTRACT

The Synthetic Aperture Radar (SAR) has been proven a useful tool of physical oceanographers studying the ocean. However, some of images can't reach for satisfied results. One is because the gray value distributions of images are broadened, i.e. the gray values are too scattered. The other case is when the angle between wave propagation direction and satellite track is too narrow, the estimated result will be far from the ground truth measured in-situ observation. Several case studies also shown that the wave direction and wavelength estimated from a sub-image are quite different from the field data measured on data buoys in the steep-down shallow water. It may suggest that some of wave information derived from SAR images can not appropriately represent wave characteristics in nearshore wave field. The reason is obvious that wave direction and wavelength are not ergodic and keeping changes in shallow water.

一、緒論

在波場觀測中，傳統方法大多是在定點上的量測，遙測(remote sensing)是面的量測，以其廣域涵蓋的特性，除可快速、廣泛獲得波場資料外，在高風險或氣候惡劣狀況下之海域，遙測可提供非常珍

貴的波浪資訊。

遙測技術除了有很多研究應用於海洋環境的監測外。在波浪研究方面，Peng & Liu (1993)以 SAR 影像資料來觀察風浪成長的變化；Monaldo et al. (1993)比較 SAR 影像波譜與模式所求得的波譜之差異；Gonzales et al.(1979)分析深海 SAR 影像計算波長與波向，與浮標實測資料比對結果發現，波長誤差約 15%，波向誤差範圍約 25° 左右。Holt et al.(1998)分析阿拉斯加灣地區深海衛星影像，每幅衛星影像選取大小為 512×512 像元，利用二維空間快速傅立葉計算影像波長與波向並與實測

1. 成大水利及海洋研究所碩士
2. 成大水利及海洋研究所博士班研究生
3. 成大近海水文中心副主任
4. 成大水利及海洋研究所教授兼近海水文中心主任

值比對，結果波長的平均誤差為 9.6 公尺，波向的平均誤差為 18.5 度，Beal et al.(1983)則探討波譜在空間上的演變特性。

往昔研究多著重於分析大洋深海區，然而一般海事工程及海上活動則發生於近岸海域居多。近年來國立成功大學近海水文中心在中央氣象局及經濟部水資局等單位的支持下，於臺灣環島近岸海域建立了許多自動化海氣象觀測測站，所觀測的即時海氣象資料提供防災搶險及工程設計等應用。近海水文中心為獲得更豐富且廣泛的資料，一方面除繼續設置現場觀測站外，另一方面，利用具有觀測廣大空間域波場資訊之衛星遙測從事波浪觀測，希望由點的波浪觀測增加面的波浪資訊。

在利用衛星影像從事波浪觀測作業之前，必須先瞭解衛星遙測工具的觀測能力及誤差範圍，基於此動機，本文探討遙測影像分析方向波譜的正確性及限制條件，進一步選取近岸的衛星子影像分析，藉由與鄰近浮標實測資料比對，計算衛星影像求得之近岸波長與波向與實測值的差異程度，探討產生差異之可能之原因，作為日後應用衛星影像於近岸波場觀測之參考。

本研究分析之衛星影像資料，取自於中央大學太空及遙測中心接收之 ERS 衛星合成孔徑雷達影像，每一全景 SAR 影像涵蓋 100 公里×100 公里範圍，每個像元(pixel)為 12.5 公尺×12.5 公尺，空間解析度為 25 公尺，遙測影像資料記錄的是電磁波回波的強度大小。為了將遙測影像分析結果與實測資料比對，選用成大近海水文中心之新竹、龍洞、蘇澳、花蓮等資料浮標(data buoy)資料，及中央氣象局之新竹外海國光平台資料，上述浮標測站大都位於近岸水深 30m 處，而國光平台測站則是位處台灣海峽中段水深約 60m 之深海處。除此，港研中心之花蓮測波浮球資料亦為本文下節驗證案例中所引用。

二、應用 SAR 影像分析海洋波浪的限制

欲利用衛星影像從事海洋波場分析時，應先瞭解衛星影像與分析工具之特性及限制條件，包含分析方法的正確性、可分析出波場的海況、甚至氣候條件等。本文選用數幅臺灣附近海域之遙測影像分

析探討如下。

2.1 SAR 影像推估方向波譜結果之驗證

為了從衛星影像分析波浪方向譜，本文參考呂(1998)與 Kuo et al. (1999)之研究，以(1)(2)式建立了一個電腦程式計算方向波譜，然在採用作為後續研究之前，本節先驗證此分析程式的正確性。

$$S(k_x, k_y) = |F(k_x, k_y)|^2 \quad (1)$$

$$S(f, \theta) = S(k_x, k_y) \times \frac{dk}{df} \quad (2)$$

式中 $S(k_x, k_y)$ 為波數能譜， $S(f, \theta)$ 則為方向波譜。

本文採用與呂(1998)分析之相同影像，為民國八十二年十一月二十六日在花蓮海域的 SAR 影像，呂(1998)以 128×128 像元之子影像為分析單元，利用二維傅立葉轉換計算方向波譜，在 FFT 前對影像資料做移動平均，最終分析之方向波譜係以鄰近 16 幅子影像樣本平均而求得。本文同樣採用類似前述之分析流程計算方向波譜，然而本文認為應不須從事樣本平均，且在將波數譜轉換至方向頻率譜時，考慮未來應用至近岸區域，本研究利用未簡化消散方程式微分式，如式(3)，

$$\frac{dk}{df} = \frac{4\pi \sqrt{gk \tanh(kh)}}{[gk \tanh(kh) + kgh \sec^2 h^2(kh)]} \quad (3)$$

分析結果如圖 1 所示，與呂(1998)的驗證結果列於表 1，結果顯示該子影像之主波長為 137.2 公尺，主波向為 121 度，本文分析結果與呂(1998)接近，證實了分析程式的正確性。

表 1 花蓮海域衛星影像(1993/11/26, 10:30)分析結果與測波浮球實測值之比較

	港研中心測波浮球實測值	本文		呂(1998)		本文與呂(1998)差異值
		分析結果	與實測值差值	分析結果	與實測值差值	
波長(m)	132.0	137.2	5.2	149.0	17.0	11.8
波向(°)	96.0	121.0	25.0	125.0	29.0	4.0
主頻(Hz)	0.100	0.093	0.007	0.092	0.008	0.001
尖峰週期(sec)	10.0	10.8	0.8	10.9	0.9	0.1

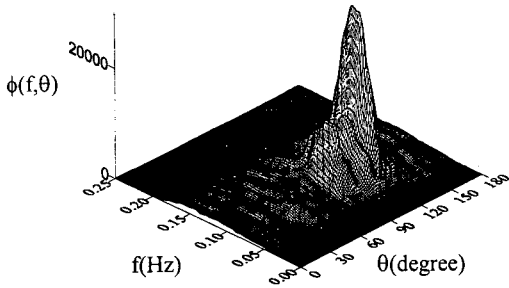


圖 1 驗證案例所得之方向波譜 [1993/11/26, 10:30 花蓮海域]

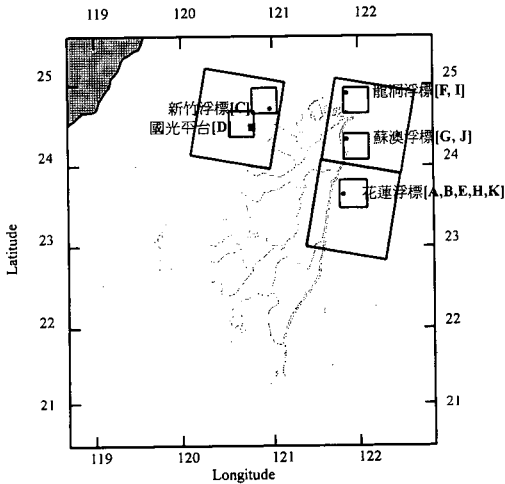


圖 2 本文分析之 SAR 影像與現場測站位置圖 [圖中大方框為整幅 SAR 影像，小方框為分析子影像，英文代碼則為案例編號]

2.2 影像灰度值統計特性對分析結果的影響

根據上節驗證結果，本文計選用了八幅台灣近岸海域的 ERS SAR 影像，因部分 SAR 影像內包含兩個現場觀測站，故共擷取出十一個分析子影像，如圖 2 所示。由於衛星影像波數譜是波形信號經轉換所得，衛星影像波數譜無法分析出明顯的主成份波，可能原因之一為與影像波形信號特性有關。為瞭解影像灰度值的統計特性對分析結果是否有影響，本文繪製灰度值分佈組體圖，結果顯示近岸地區無法分析出主波長、主波向之影像其灰度值分佈

較廣，而可分析影像灰度值分佈則較集中，如圖 3。除近岸分析子影像外，本文亦同時分析了數個外海區域子影像，也得到類似之結果，證實了不論淺海或深海地區子影像波譜分析均會受灰度值分佈所影響，但其影響機制為何，需待進一步研究。

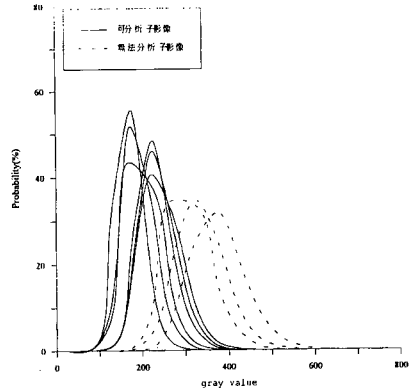


圖 3 可分析與無法分析之子影像灰度值分佈圖

2.3 波向與衛星航向關係對分析結果的影響

除了灰度值可能對影像分析造成影響外，本文亦探討波浪傳遞方向與衛星飛行方向的關係對於影像方向波譜推估之影響。分析結果如圖 4 所示，圖中黑柱體表示以影像分析波長在該波向上與實測值的差值，其中最外圈 ∞ 代表無法分析，由分析結果可知波向與衛星飛行方向之關係影響衛星影像推估波長與波向之影響程度，波向與衛星飛行方向越接近者，波長波向之推估與實測值差異越大，反之差異較小，波向誤差亦有類似之結果(林, 2000)，此結果亦驗證了 Alpers et al. (1986) 由理論推導之結果。

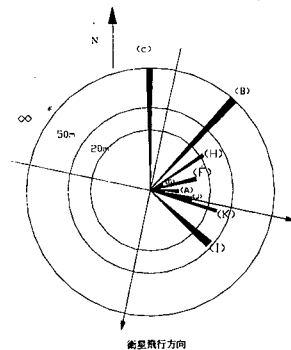


圖 4 實測波浪前進方向與衛星航向之關係對影像推估波長與實測波長差異值之影響

上述係分析淺海地區子影像所得，為瞭解此結果是否僅為局部現象，本文選取深海處國光平台附近子影像分析，該影像為民國八十七年二月五日所攝，屬冬季東北季風期間，假設該地波向與風向一致，均為東北向，即波向與衛星飛行方向一致。分析結果顯示，該子影像無法分析出主成份波，證實了深海區域子影像分析結果亦可能受到波向與衛星飛行方向關係的影響，也就是上述結論並非局部現象，淺水區與深海區影像均有類似之結果。由長期觀測資料統計發現，台灣西部海域之波向分佈主要集中在 ± 22.5 度附近，如圖 5，此方向與 ERS 衛星飛行方向接近，而東部波向統計結果大都介於 70~110 度之間，經由上述的討論發現，應用 ERS/SAR 影像在花蓮海域可分析出主成份波的機率高於新竹海域影像可分析之機率。

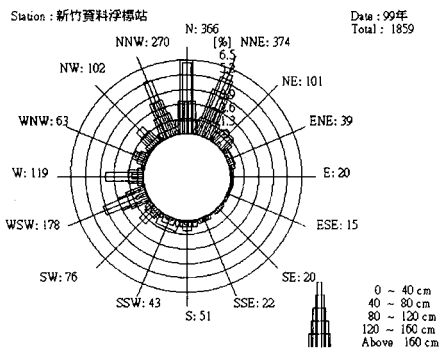


圖 5 新竹海域之波高波向玫瑰圖

三、應用 SAR 影像於分析近岸波場

人類活動區域及海事工程地點多位於近岸淺水海域，本節針對 SAR 影像於分析近岸波場，探討應用近岸 SAR 影像分析方向波譜時所需注意的技巧，再藉由與鄰近實測結果的比對，比較其與實測值的差異程度，探討其可能之原因。

3.1 比對案例說明

為了解 SAR 影像分析近岸波場與實測值之差異程度，本文將前述十一個分析子影像與附近現場實測資料編號為 A~K 比對案例，如表 2 所示，其中案例[A]所分析之影像與呂(1998)相同，已於前章中先

行探討兩者分析結果的差異。此十一個比對案例中，有二例位於臺灣西部新竹海域，四例位於臺灣東北部海域，另外五例則位於臺灣東部花蓮海域，如圖 2 所示。

表 2 近岸衛星影像推估波場資料與實測資料比對案例說明

影像編號	影像位置	影像接收時間	比對之測站現場	現場觀測資料			案例編號
				波高 (cm)	週期 (sec)	波向 (°)	
1	花東海域	1993 /11/26	花蓮資料浮球	166	8.4	96	A
2	花東海域	1998 /02/02	花蓮浮標	122	6.6	45	B
3	新竹海域	1998 /02/05	新竹浮標	221	5.8	0	C
			國光平台	287	6.5	-	D
4	花東海域	1998 /11/09	花蓮浮標	142	8.2	90	E
5	東北角海域	1999 /11/29	龍洞浮標	96	6.7	79	F
			蘇澳浮標	167	7.0	68	G
6	花東海域	1999 /11/29	花蓮浮標	162	6.0	56	H
7	東北角海域	2000 /02/07	龍洞浮標	158	5.9	45	I
			蘇澳浮標	142	7.1	101	J
8	花東海域	2000 /02/07	花蓮浮標	145	5.9	112	K

*波向係以正北為零度，順時針計算

3.2 近岸 SAR 子影像推估波場要點

3.2.1 近岸子影像大小的選取

由頻譜分析的經驗知道，所取的信號數據多寡將會影響分析出來結果的精度。在衛星影像分析過程中，若數據太少，影像因包含波數不足將影響到分析的準確度，但數據過多時，若資料沒有符合均一性將造成不可信賴的分析結果，往昔的學者 (Beal,1986)選取 512×512 像元為分析單元之研究，但該分析影像仍為處深海地區。本文所欲分析之影像乃位於近岸淺水區，上述子影像大小並不一定適合於淺水地區衛星影像的波浪分析。本研究將嘗試選取不同大小的子影像，探討選取多大的子影像較適合從事近岸影像之方向譜分析。

本文於測站附近選取數種不同大小子影像從事譜分析，每個子影像皆有涵蓋現場測站。以各不同大小子影像所分析之波長、波向與實測值之誤差程度來選擇較適合分析之子影像，而遙測與實測之差異程度可由其計算比對結果之不確定性來表示，不確定性越小，選擇該子影像分析之準確度較高。本文以鬚盒圖(box plot)來說明分析結果，如圖 6 所示，圖中長形方塊內橫線為差異均值(mean)，長形方塊下邊緣與上邊緣分別代表 25%與 75%之差異程度。由鬚盒圖分析結果知，以 128×128 像元的子影像來作分析所得的波長及波向與實測值之平均差值較其它像元所分析的結果小，因此本文以 128×128 像元的大小作為分析近岸 SAR 影像之單元。

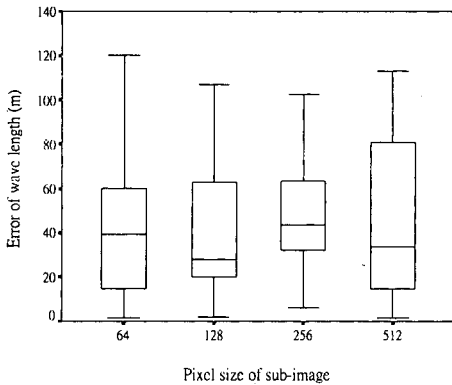


圖 6 不同大小子影像對波長推估之差異影響

3.2.2 近岸子影像樣本平均之探討

往昔分析衛星影像方向譜過程中，有以數個子影像分析方向譜的樣本平均來降低隨機誤差(呂,1998)。在近岸地區由於波場隨水深而變化，利用方向譜樣本平均方法降低隨機誤差，可能導致誤差加大。為證實此觀點，本文選取花蓮與蘇澳近岸海域子影像為分析對象，分別代表底床坡度陡與緩之案例。在測站附近選取一幅 512×512 像元子影像，將此子影像等分為 16 個 128×128 像元子影像，將這 16 個子影像所得之波數譜進行樣本平均。分析結果如表 3 所示，表中說明了是否有進行樣本平均之衛星影像波長、波向結果與實測值的差異程度，結果顯示了近岸地區衛星影像波數譜作樣本平均後與實測值差異反而增大，證實了近岸衛星影像分析波場並不宜作波數譜樣本平均的計算。

表 3 單一個 128×128 像元子影像與 16 個子影像樣本平均分析結果之比較

		單一個 128×128 子影 像結果與實測 值差異	16 個 128×128 子影像樣本平 均結果與實測 值差異	備註
蘇澳海域 子影像 [1999/11/29, 案例 G]	波長	1.6m / 1.2%	22.9m / 17.1%	底床坡 度緩平 之案例
	波向	2°	11°	
花蓮海域 子影像 [2000/02/07, 案例 K]	波長	34.7m / 27.2%	48.8 / 42.1%	底床坡 度較陡 之案例
	波向	2°	18°	

3.3 SAR 遙測與浮標實測波場之比對分析

十一個案例比對結果如表 4 所示，分析結果顯示並非所有近岸子影像均可從事波場分析。從可分析的七個案例計算得其波長平均差異約 16%，波向平均差異約 12 度。此比對差異結果較前人於深海之比對案例差異為大，本文另外計算深海區域子影像方向波譜，由於深水海域並無現場測站供比對，故採用波浪推算的方法，以近岸浮標實測值為起始條件，配合水深等資料推算深水区子影像處的波長及波向，由 SAR 影像分析結果與波浪推算結果比對分析，得知深海案例之比對差異確實小於近岸比對案例，雖然波浪推算本身也隱含了推算的誤差，但此結果亦具有某程度的信賴水準。

3.4 近岸空間波場分佈對比對結果之影響

以往波浪的觀測大多是點的量測，所測得波浪資訊為代表該量測點附近的波浪特性，衛星遙測波浪是面的量測，所得波浪資訊為代表該遙測區域的波浪特性。在近岸地區水深變化範圍大，波長分佈不均，從衛星影像所分析之波長為代表所分析區域之特徵波長。本節目的在於探討近岸波場變化對應用衛星影像分析近岸波場之影響。

3.4.1 近岸海域之波場分佈

假設一長峰波傳遞過程中週期維持不變，當此波由深海處傳遞至近岸附近時波長會變短，且波浪傳遞至近岸過程中，波向可能會受折、繞射等影響

表 4 SAR 影像推估方向波譜與實測方向波譜之比對結果

案例編號	SAR 影像				現場實測資料				比對差異			
	波長 (m)	波向 (°)	主頻 (Hz)	尖峰週期 (sec)	波長 (m)	波向 (°)	主頻 (Hz)	尖峰週期 (sec)	波長誤差 (m) / (%)	波向誤差 (°)	主頻誤差 (Hz)	尖峰週期誤差 (sec)
A	137.2	121	0.093	10.8	132.0	96	0.100	10.0	5.2 / 3.9	25	0.007	0.8
B	-	-	-	-	96.5	45	0.125	8.0	-	-	-	-
C	-	-	-	-	87.0	0	0.125	8.0	-	-	-	-
D	-	-	-	-	104.6	-	0.120	8.3	-	-	-	-
E	-	-	-	-	200.8	90	0.076	13.1	-	-	-	-
F	144.8	96	0.100	10.0	129.3	79	0.105	9.5	15.5 / 12.0	17	0.005	0.5
G	132.4	66	0.098	10.2	134.0	68	0.096	10.5	1.6 / 1.2	2	0.002	0.3
H	169.6	58	0.111	9.0	147.7	56	0.096	10.5	21.9 / 14.8	2	0.047	1.5
I	162.5	114	0.100	10.0	115.1	135	0.113	8.8	47.4 / 41.2	21	0.013	1.2
J	132.0	114	0.094	10.6	118.0	101	0.106	9.5	14.0 / 11.9	13	0.012	1.1
K	162.4	114	0.106	9.5	127.7	112	0.106	9.5	34.7 / 27.2	2	0.000	0.0
								平均	20.0 / 16.0			

注:「-」表示該 SAR 子影像無法分析出明顯主波長與主波向,故該案例無比對結果

而轉向。圖 7 為以線性分散方程式 (dispersion relationship) 來描述波浪傳遞過程中波長隨水深變化之情形。由圖中可知，當波浪週期越長時，波長在近岸地區變化越大，以週期為 9.5 與 10.5 秒之波浪為例說明，當水深從 15 公尺變化至 60 公尺時，週期為 9.5 秒之波浪，其波長變化約為 50 公尺，而週期為 10.5 秒之波浪，波長變化達 70 公尺，

上述的討論還是在長峰波的假設之下說明事實上近岸海域波場還不是如此地單純，因此若近岸影像所涵蓋波浪週期較長或水深變化較大時，該幅影像內之波場分佈是相當不均勻的。

3.4.2 SAR 影像描述近岸波場之探討

在本文所分析的案例中，案例 G 與案例 H 分屬蘇澳海域與花蓮海域，其衛星影像附近波浪實測週期資料均為 10.5 秒，兩幅影像涵蓋區域之斷面水深變化情形分別如圖 8 所示，蘇澳浮標位於深約 20 公尺處，花蓮浮標則位於水深約 31 公尺處，本文分析之邊長 128 像元的子影像在兩地涵蓋之水深範圍分別介於 20~60 公尺及 30~130 公尺之間，對照圖 7 得知兩影像區域之實際波長範圍分別為 130~170 公尺與 145~170 公尺左右，而利用近岸 SAR 影像所分析

之結果，蘇澳為 132 公尺，花蓮為 169 公尺，兩值均在上述波長範圍內，而以水深較淺處與實測值較接近。

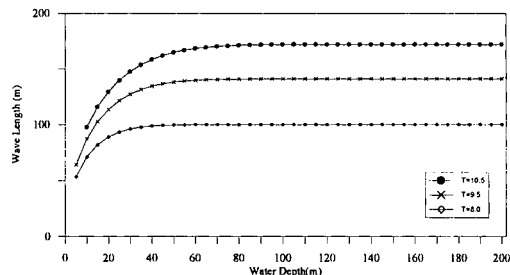


圖 7 分散關係式所描述之波長與水深關係

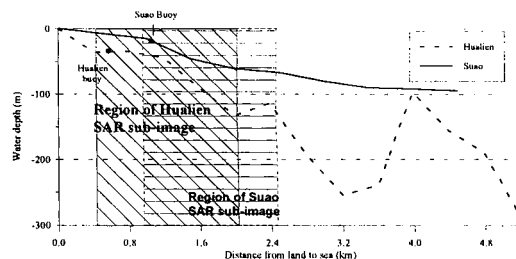


圖 8 花蓮與蘇澳海域之近岸水深變化與分析影像位置

由前述的討論得知，由影像分析得之波長或波向來描述近岸複雜的空間波場並不適合，因此將影像分析結果與單點實測值比對並無意義。在深海區，水深變異對波場無影響，空間波場可視為均勻，由影像所分析得波場資訊代表性高，若影像內有實測觀測，比對上的差異必是小於近岸比對結果的，表 3 中蘇澳案例的比對差異結果小於花蓮案例亦可以相同之原因說明之，由於花蓮近岸水深變化較大，波長變異大，由影像分析之波長代表性不足；然在蘇澳地區由於近岸水深變化小，波長變異小，由影像分析之波長與實測差異小。

若考慮影像分析之波長無法代表變化大之近岸波場，而以較小之子影像進行分析，以獲得較具代表性之波長，本文探討結果發現，近岸波場較小子影像分析效果不一定較 128×128 像元分析效果佳，如表 5 所示。在前節中曾分析不同大小子影像與實測值之差異，結果 128×128 像元子影像分析後與實測值差異仍低於 64×64 像元子影像分析結果，此結果乃因為較小的子影像所涵蓋波浪數目不足造成分析效果不佳所致。

表 5 64 像元與 128 像元子影像分析結果與實測值差異表

	波長誤差		波向誤差	
	64 像元子影像分析結果	128 像元子影像分析結果	64 像元子影像分析結果	128 像元子影像分析結果
1999/11/29 蘇澳影像	14.5	1.6	0.2	2.4
2000/02/07 蘇澳影像	42.0	14.4	11.0	13.4
1999/11/29 花蓮影像	31.2	21.8	7.4	2.0
2000/02/07 花蓮影像	1.2	34.7	4.1	2.0

四、結論與建議

衛星遙測是近年來從事空間波浪觀測的新方法之一，應用衛星遙測於波浪觀測等相關研究之前，本文驗證以 SAR 影像分析方向波譜的正確性，探討此工具的適用性及限制條件。由於人類活動及海事工程地點大部分位於近岸海域，受地形、水深等因素的影響，近岸波場變化大，空間波浪特性分佈不均勻，為瞭解衛星影像分析近岸波場之結果，本文

探討分析近岸 SAR 影像時所需注意的要點，藉由與鄰近實測資料比對，分析其差異程度，推論可能之原因。根據先前各章的分析結果歸納為下列結論，最後並提出建議與未來可能之研究方向。

4.1 結論

1. 本文應用二維空間傅立葉轉換理論發展出一個從 SAR 影像推估方向波譜的方法，經數值模擬與前人研究結果比較，證明本文之分析程式正確。
2. 並非所有影像均可分析出方向波譜，至少有影像灰度值型態及衛星飛行方向與波向之關係兩點因素會影響分析結果的好壞。
3. 當影像灰度值之平均值越高，變異數越大，則分析所得之方向譜越難分辨出波向及波長。
4. 當衛星航向與波向越接近，分析所得之波向與波長與實測值之差異即越大，甚至出現無法以本文方法分析之狀況。
5. ERS-1 衛星之航線為 12.9° 下降模式。經對花蓮、新竹長期實測波向統計分析得知新竹全年主波向以 NNW 到 NNE 之發生頻率頗高，顯示應用衛星影像於分析新竹海域波浪資料可能會有較大的機率無法求得波浪相關資訊。
6. 分析近岸波場所選取之子影像大小以 128×128 像元(1.6km×1.6km)計算結果有較小之不確定性。
7. 本文分析十一個近岸波場案例，其中四個案例受影像灰度值分佈與衛星航向影響，無法自影像中成功求得方向波譜資訊，其餘七個可成功分析。分析結果顯示，自近岸衛星影像求得的波長及波向與海面資料浮標所測得結果之差異，較前人在深海中所得之差異為大，本文以理論推算法求取之深海波長與波向與影像分析結果比對，亦證明近岸之差異大於深海。
8. 在深海中常用樣本平均的手段減低 FFT 計算過程中之隨機誤差，然而近岸地區由於水深影響，除非樣本均位於相同之水深條件下，否則樣本平均反而容易造成更大之誤差。
9. 經探討水深對波長之影響得知，子影像空間內之水深變化量對波長之影響頗大，且其影響程度隨水深變淺而加劇，在底床坡度陡峭的海域，用影像分析探討近岸波場需考慮水深變化因素。
10. 將子影像自 128×128 降為 64×64 像元應用於分析近岸波場，固然可因子影像縮小，使子影像內水深

變化減小，從而降低波長之改變量，然而由於64×64 像元子影像因空間過小造成之差異越大，因此仍以128×128 較適用於近岸波場分析。

4.2 建議

1. 本文僅針對灰度值及衛星航線對衛星影像推估方向波譜之影響作定性上之探討，定量上結果有賴更多樣本之統計分析求得。
2. 近岸地區波場具非均勻性(nonhomogeneous)，可考慮利用小波理論(wavelets theory)具有處理非均勻性資料之特點，用於分析近岸影像求取方向波譜。

謝誌

本文為國科會專題研究計劃(NSC 89-2611-E-006-040)研究成果。中央氣象局提供比對資料、中央大學太遙中心協助處理遙測影像，使本研究得以完成，謹致感謝之意。

參考文獻

1. 林鴻鵬，“衛星影像分析近岸波場之探討”，國立成功大學碩士論文，台南，民國八十九年(2000)。
2. 呂黎光，“衛星影像應用於波浪能譜分析與近岸水深推算”，國立交通大學博士論文，新竹，民國八十七年(1998)。
3. Alper, W. R. and C. Bruening, “On the relative importance of motion related contributions to the SAR imaging mechanism of ocean surface waves”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-24, pp. 873-885, 1986.
4. Beal, R. C., T. W. Gerling, D. E. Irvine, F. M. Monaldo and D. G. Tilley, “Spatial variations of ocean wave directional spectra”, *J. G. R.*, Vol. 91, No. C2, pp. 2433-2449, 1986.
5. Gonzales, F. I., R. C. Beal, W. E. Brown, P. S. Releonibus, J. S. Sherman, J. F. R. Gowere, D. Lichy, D. B. Ross and R. A. Shuchman, “Seasat synthetic aperture radar: Ocean wave detection capabilities”, *Science* 204, pp. 1418-1521, 1979.
6. Holt, B., A. K. Liu and D. W. Wang, A. Gnanadesikan and H. S. Chen, “Tracking storm-generated waves in the northeast Pacific Ocean with ERS-1 synthetic aperture radar imagery and buoys”, *J. G. R.*, Vol. 103, No. C4,

1998.

7. Kuo, Y. Y., L. G. Leu and I. L. Kao, “Directional spectrum analysis and statistics obtained from ERS-1 SAR wave images”, *Ocean Engineering*, Vol. 26, pp. 1125-1144, 1999.
8. Monaldo, F. M., T. G. Gerling, and D. G. Tilley, “Comparison of SIR-B SAR Wave Image Spectra with Wave Model Predictions: Implications on the SAR Modulation Transfer Function”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 31, No. 6, 1993.
9. Peng, C. Y. and A. K. Liu, “Observations of wind wave growth by ERS-1 SAR”, *Ocean Wave Measurement and Analysis*, Published by ASCE, pp. 935-942, 1993.