

三套超音波偵測系統運用於蝙蝠回聲定位研究之比較

Comparison of Three Ultrasonic Detecting Systems for Bat Echolocation Study

周政翰¹ 林芸安² 胡伯齊² 張簡琳玟³ 鄭錫奇^{3,*}

Cheng-Han Chou¹, Yun-An Lin², Po-Chi Hu², Lin-Wen Chang-Chien³
and Hsi-Chi Cheng^{3,*}

¹ 私立真理大學休閒遊憩事業學系 台南縣麻豆鎮北勢里北勢寮 70 之 11 號

² 國立台灣大學生態學與演化生物學研究所 台北市羅斯福路四段 1 號

³ 行政院農業委員會特有生物研究保育中心 南投縣集集鎮民生東路 1 號

¹ Department of Recreation and Leisure, Aletheia University, Tainan, Taiwan

² Institute of Ecology and Evolutionary Biology, National Taiwan University, Taipei, Taiwan

³ Endemic Species Research Institute, Jiji, Nantou, Taiwan

* 通訊作者: chenghc@tesri.gov.tw

* Corresponding author: chenghc@tesri.gov.tw

摘要

本研究運用 AnaBat、Pettersson 及 Avisoft 等 3 套超音波偵測與錄音系統檢視台灣蝙蝠超音波，分析探討其功能上之差異，以確認每套系統對於蝙蝠超音波研究之應用面。本研究選定使用變頻式(FM)超音波之台灣鼠耳蝠(*Myotis taiwanensis*)及常頻式(CF-FM)音頻的台灣葉鼻蝠(*Hipposideros terasensis*)為測錄對象，並比較其音頻特徵值之差異，包括最高頻率、最低頻率、特徵頻率及持續時間。在相同的條件下，同時以 3 套系統進行蝙蝠超音波的測錄及比較，結果顯示使用不同超音波類型的蝙蝠種類、各系統錄音感度與硬體配備，以及各套裝系統分析軟體判定有效蝙蝠音頻之功能等因素會導致判定的有效音頻數及各項音頻特徵測量值有顯著的差異。我們建議 AnaBat 系統適用於蝙蝠類動物的普查與監測，而 Pettersson 與 Avisoft 二系統則可用於進行較精細的蝙蝠聲音學與行為生態學研究。

Abstract

We used three bat detector systems, AnaBat, Pettersson and Avisoft, to record and analyze echolocations of two bat species with different echolocation types: *Myotis taiwanensis* with FM type and *Hipposideros terasensis* with CF-FM type. Maximum frequencies, minimum frequencies, characteristic frequencies and durations of pulses of the bat echolocations were described and compared among the three systems. The results showed that the function and application of each of the detector systems depend on sensitivity of its recording apparatus and analytical software and on the echolocation type (FM or CF-FM) of the bat. The AnaBat system is useful for bat fauna survey and long-term monitoring, whereas the Pettersson and Avisoft systems are suitable for behavior study and for solving echolocation issues.

關鍵詞：回聲定位、蝙蝠偵測器、台灣鼠耳蝠、台灣葉鼻蝠

Key words: echolocation, bat detector, *Myotis taiwanensis*, *Hipposideros terasensis*

收件日期：98年8月27日

接受日期：98年11月25日

Received: August 27, 2009

Accepted: November 25, 2009

緒 言

蝙蝠為唯一具有飛行能力的哺乳類動物。全世界蝙蝠物種約有 1,000 多種，約占已知哺乳動物種數的 1/5，而台灣地區(包含離島)迄今已發現至少有 35 種蝙蝠(鄭及張簡 2008)，約占台灣陸域哺乳類動物種總數的 40%，其中僅台灣狐蝠(*Pteropus dasymallus formosus*)、印度犬果蝠(*Cynopterus sphinx*)及棕果蝠(*Rousettus leschenaultii*)為食果性蝙蝠，其餘 32 種皆為食蟲性蝙蝠。由於食蟲性蝙蝠晝伏夜出之習性與夜間靈巧的飛行能力，導致觀察不易且捕捉困難，因而在台灣有關哺乳類調查與研究中，蝙蝠類是較為缺乏的一類。直至 1988 年起，始有國內的研究者著手進行包括物種調查、分類鑑定、活動模式、空間分布、資源利用等研究

(盧 1988；鄭及張簡 2008)，然迄今仍有諸多知識尚待發掘釐清。為解決此困境，許多外國的蝙蝠研究者運用食蟲性蝙蝠回聲定位(echolocation)的獨特性進行相關研究，並根據超音波性質持續研發出不同的套裝蝙蝠偵測系統，且各系統也隨著近幾年資訊產品的發展而有改良的儲存裝置。台灣過去對於蝙蝠超音波回聲定位的研究不多，林等(2004)所編著之《台灣的蝙蝠》一書中列有 6 種台灣蝙蝠之單一頻譜資料，但未實際運用任何超音波測錄系統進行研究，乃由日籍學者松村澄子所提供的資料。趙(2001)曾運用 AnaBat 系統錄製東亞家蝠(*Pipistrellus abramus*)、摺翅蝠(*Miniopterus schreibersii*)、台灣小蹄鼻蝠(*Rhinolophus monoceros*)及台灣葉鼻蝠(*Hipposideros terasensis*)自由飛行之回聲定位叫聲，並進行比較 4 種蝙蝠

回聲定位叫聲特性，結果指出叫聲頻率最高的是台灣小蹄鼻蝠，最低的是東亞家蝠。周及李(2006)曾針對 AnaBat 及 Pettersson 系統的使用及背景文獻回顧並探討此二系統的系統原理，但無同時以二系統偵測蝙蝠回聲定位叫聲來比較實際錄音的差異。李(2007)利用 Pettersson 錄製台灣葉鼻蝠室內飛行操作實驗，發現台灣葉鼻蝠在同時飛行時具有避免干擾反應(jamming avoidance response)。鄭及周(2007)利用 AnaBat 系統建置了台灣地區 11 種食蟲性蝙蝠之回聲定位叫聲資料庫。近年來，台灣地區蝙蝠研究者引進使用的套裝測錄系統有 3 種，分別為澳洲製的 AnaBat 系統、瑞典製的 Pettersson 系統及德國製的 Avisoft 系統，其系統原理分述如下：

一、AnaBat system (Titley Electronics, Ballina, New South Wales, Australia)

本系統主要原理是將所錄得蝙蝠的超音波除以 1 個基數讓蝙蝠超音波降至人耳可聽到的範圍，此方法稱為「分頻法」(frequency division)。1998 年之前 AnaBat II 需以磁帶記錄蝙蝠回聲定位聲音，並由電腦控制錄音系統的起始與各項設定；1999-2006 年時期記錄設備轉變變成小尺寸快閃記憶體(compact flash)，並發表記錄器 CF ZCAIM；2006 年後則將偵測系統與記錄器整合，發表 AnaBat SD1 之型號。AnaBat 的器材主體結構包含 1 個超音波接收麥克風(接收範圍為 10-200 千赫)及一控制分頻法之主機，此外，後端連接一處理器搭配儲存及記錄裝置(zero-crossing interface module, ZCAIM)，以點狀資料描述記錄蝙蝠之超音波頻譜。

二、Pettersson system (Pettersson Elektronik AB, Tallbacksvagen 51, S-75645 UPPSALA, Sweden)

本系統之原理除了上述的分頻法外，另運

用 2 種方法可將超音波降至人耳可聽音頻，分別為慢速播放的時間擴張法(time expansion)及選定只轉換某個頻率訊號的外差法(heterodyne)。本研究所採用的 D980 偵測器本體包含 1 個超音波音頻麥克風(音頻接收範圍為 10-200 千赫)，其後接有一雜訊過濾器(Pettersson F2000 control/filter unit)，藉由時間擴張法將蝙蝠叫聲之類比資訊通過快速擷取卡(DAQ Card-6062E)的處理後，傳至電腦軟體(BatSound Pro 3.31b)運算，以數位檔案(.wav)格式儲存於電腦中。2005 年發表的 D1000X 則是利用小尺寸快閃記憶體儲存聲音資料，並以數位(.wav)格式儲存。

三、Avisoft system (Avisoft Bioacoustics Kirchstr. 11 13158, Berlin, Germany)

本系統為一廣用型的聲音記錄分析系統，可利用不同的麥克風及不同的濾波器測錄不同音頻範圍的聲音。針對蝙蝠而言，主要利用慢速播放的時間擴張法將超音波降至人耳可聽音頻。Avisoft 本體結構包含 1 個高音音頻接收麥克風(本研究所採用的音頻範圍 10-750 千赫)，後端連接一快速擷取濾波器(本研究採用 USG 416 H)，經由濾波器進行快速傅立葉轉換(fast Fourier transfer, FFT)，將蝙蝠聲音類比訊號轉換為數位訊號，再將訊號送往電腦軟體(Avisoft-SASLab Pro 4.3)記錄聲音資料，並以數位(.wav)格式儲存。

本研究目的在於運用目前台灣蝙蝠研究者所使用的 3 套蝙蝠回聲定位錄音系統進行超音波偵測與錄音功能異同之檢視，並分析探討運用於台灣地區蝙蝠物種研究之適當性。

材料與方法

一、蝙蝠研究對象選定與採集方法

食蟲性蝙蝠超音波音頻型態分為常頻式(constant frequency, CF，主要特徵音頻多為固

定不變橫平型)及變頻式(frequency modulated, FM, 音波頻率為落差變化大的斜線型)2型(Schnitzler and Kalko 2001)。因此本研究選定台灣地區使用不同型超音波的2種特有種蝙蝠為研究對象,選擇包括使用變頻式(FM)超音波音頻之台灣鼠耳蝠(*Myotis taiwanensis*)及使用常頻式但於末端含一變頻式超音波音頻(CF-FM)的台灣葉鼻蝠,此2種蝙蝠皆為台灣地區典型的洞穴型食蟲性蝙蝠。台灣鼠耳蝠採自棲息在屏東縣萬巒鄉之人工排水渠道的群集,而台灣葉鼻蝠採自棲息在台南縣東山鄉之人工排

水渠道的群集;2物種皆選取雌雄成蝠各5隻作為超音波音頻測錄與分析之樣本。

二、錄音系統的架設與錄音方式

(一) 錄音系統的架設

將3套錄音系統之麥克風固定於一木板底座上,確保每次錄音時3型麥克風接收器皆位於同一接收平面,再以麥克風延長線連接到後端記錄器,木板下方以雲台連接至腳架,架設高度約離地1.5m高(圖1)(參考Fenton *et al.* 2001)。



圖 1. 架設於平台上的3模組蝙蝠偵測器的麥克風,由左至右依序為 Pettersson、Avisoft、AnaBat 系統。

Fig. 1. Microphones of Pettersson (left), Avisoft (center) and AnaBat (right) ultrasonic detecting systems on the platform.

(二) 野外錄音工作

蝙蝠超音波資料收集是在野外蝙蝠棲息洞穴外周遭的空曠處進行。因蝙蝠類為晝伏夜出的動物,為避免過度干擾棲息中的蝙蝠群集,研究人員選擇蝙蝠即將離巢的黃昏時刻進入洞穴內,以手撈網撈捕停棲在岩壁上的蝙蝠個體。當採得5隻雄性及5隻雌性成熟個體(成

幼體之判斷依據指骨軟骨間隔帶之有無判定;Kunz and Robson 1995)即停止撈捕動作。所有被捕獲的蝙蝠個體均暫時放置於透氣布袋中。當黑夜降臨,洞穴中的蝙蝠群集陸續外飛且遠離棲所後始開始進行錄音工作。每次錄音工作僅以1隻個體為操作對象。首先,研究人員在所捕獲個體的腹面以醫學用黏膠 Skin-Bond

(Smith & Nephew Pty. Ltd.)黏貼一螢光棒(2.9×23 mm)，以協助夜間觀察測錄(螢光棒將於數天後自動脫落)。接著，將蝙蝠個體自然含握在手中，讓其發出超音波，以進行錄音設備的最後調校，並將各錄音系統調整至單一個體之最適感度；調校確定後，接著拋擲鑰匙以其發出高頻之聲響作為錄音檔案的開始記號，並隨後在距離麥克風約5-10m處釋放蝙蝠，讓蝙蝠個體朝向3組麥克風架設處飛行，並由3套系統同時進行超音波的測錄工作。每回合錄音時間約持續15 sec。

三、分析比較蝙蝠回聲定位因子

將測錄所得之聲音片段，根據Kingston *et al.* (2003)以7個連續音頻作為蝙蝠正常飛行下所發出的音頻作為有效音頻之判斷。有效音頻

分別以不同的蝙蝠偵測套裝原件之處理軟體進行篩選處理，並將各系統所錄得的蝙蝠超音波之最高頻率(Fmax, maximum frequency)、最低頻率(Fmin, minimum frequency)、特徵頻率(Fc, characteristic frequency, referring to the flattest part of the pulse)及持續時間(Dur, duration of pulse)等聲音特徵值匯入統計軟體(SAS 9.0)進行單一叫聲的測量，所得之測量值將作為單一因子，進行多重比較分析(MANOVA)比較。各系統之對應的分析軟體及處理方式分述如下：

(一) AnaBat 系統

將測錄之蝙蝠音頻檔案匯入Analog (Version 4.9j)軟體後，將高頻之鑰匙標示音及其他非蝙蝠所發出的雜音以人工篩選方式剔除(圖2)，並以內建自動測量系統測量特徵值並匯出資料。

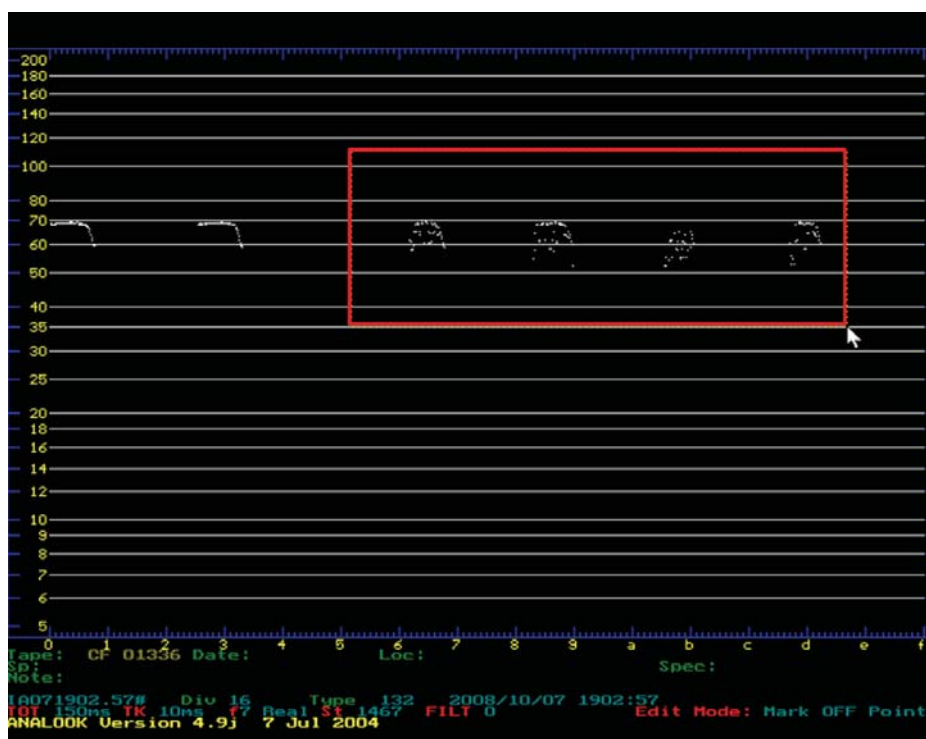


圖 2. 選定並剔除不完整音頻之 Analog 畫面(如紅色框所示)。

Fig. 2. Checking and removal of noise and fragmented echoes (red square area) from AnaBat spectrum.

(二) Pettersson 系統

將測錄之蝙蝠音頻檔案利用 BatSound Pro (Version 3.31b) 軟體去除非蝙蝠叫聲之低音頻雜訊，並進行音頻資料的測量，以所得之清晰叫聲進行分析數值比較。為避免失真的蝙蝠音頻造成測量上的誤差，所選取範圍為高頻之鑰匙標示音後的叫聲中，未超過本系統最大能量值的叫聲，使用 BatSound Pro 內建之過濾背景雜訊，讓所分析的叫聲呈現雜訊較低的圖譜

(圖 3)。除特徵音頻根據 AnaBat 系統之定義以人工方式針對每一有效音頻進行檢視測量外，其餘的最高、最低及週期 3 種音頻值皆使用 BatSound Pro 軟體進行自動測量。將自動量測之判定叫聲的最小能量值設定為 -16dB，視為可辨別叫聲波形圖，因此我們選取叫聲波形圖大於 -16dB 之叫聲進行聲音特徵值之測量。然而每個蝙蝠叫聲不盡相同，因此會再以人工判別選取最適當能量值作為設定自動分析的依據。

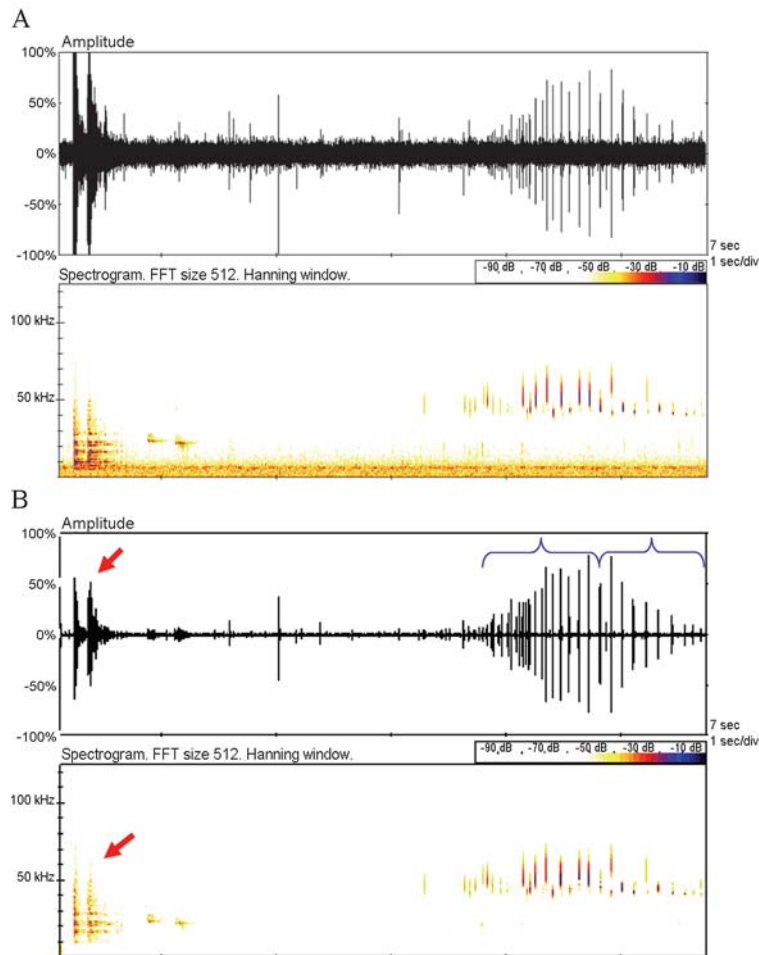


圖 3. 過濾低頻雜音前的高頻之標示音及完整叫聲(A)及過濾低頻雜音後的高頻之標示音及完整叫聲(B)。B圖中紅色箭頭處為標示音；圖右之藍色括號左為蝙蝠飛近麥克風，右為蝙蝠遠離麥克風時的叫聲。

Fig. 3. The recorded files before filtrationing (A) and after filtrationing (B) (red arrows, marking sound; left blue bracket, bat approaching the microphone; right bracket, bat away from the microphone).

(三) Avisoft 系統

將測錄之蝙蝠音頻檔案利用 Avisoft-SASLab Pro (Version 4.3) 軟體去除非蝙蝠叫聲之低音頻雜訊，並將所得之清晰叫聲進行分析數值比較。所選取的範圍為高頻之鑰匙標示音後的叫聲，選取未超過最大能量值的叫聲，以避免失真的蝙蝠音頻，造成測量上的誤差，而使用 Avisoft-SASLab Pro 內建之過濾背景雜訊可讓所分析的叫聲呈現雜訊較低的圖譜(圖 4)。除

特徵音頻根據 AnaBat 系統之定義以人工針對每一有效音頻進行檢視測量外，其餘的最高、最低及週期 3 種音頻值皆使用 Avisoft-SASLab Pro 軟體進行自動測量。將自動量測判定叫聲的最小能量值設定為 -16dB，視為可辨別叫聲波形圖，因此我們選取叫聲波形圖大於 -16dB 之叫聲進行聲音特徵值之測量。然而每個蝙蝠叫聲不盡相同，因此會再以人工判別選取最適當能量值作為設定自動分析的依據。

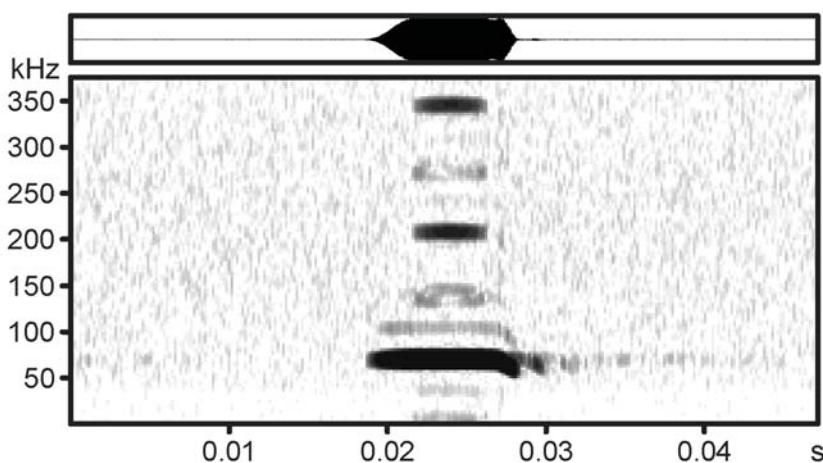


圖 4. 因聲音能量大於麥克風所能蒐錄的範圍而造成的失真音頻。

Fig. 4. Overloading of the energy of echoes over the system.

結 果

一、音頻量測值

(一) AnaBat 系統

本研究以 AnaBat 系統所錄得台灣鼠耳蝠之可判別音頻檔案共計有 10 個檔案，包含 355 個有效叫聲。最高音頻範圍為 62.10 ± 7.28 千赫(kHz)，最低為 45.95 ± 1.98 kHz，特徵音頻為 52.89 ± 3.76 kHz，持續時間為 1.38 ± 0.56 毫秒(ms)。所錄得台灣葉鼻蝠之可判別音頻檔案共計有 8 個檔案，包含 143 個有效叫聲。最高音頻範圍為 68.75 ± 0.66 kHz，最低為 60.17 ± 3.01 kHz，特徵音頻為 68.32 ± 1.20 kHz，持續

時間為 7.19 ± 1.92 ms (表 1)。

(二) Pettersson 系統

本研究以 Pettersson 系統所錄得台灣鼠耳蝠之可判別音頻檔案共計有 10 個檔案，包含 268 個有效叫聲。最高音頻範圍為 59.63 ± 5.99 kHz，最低為 42.81 ± 3.11 kHz，特徵音頻為 46.11 ± 2.40 kHz，持續時間為 2.01 ± 0.83 ms。所錄得台灣葉鼻蝠之可判別音頻檔案共計有 8 個檔案，包含 184 個有效叫聲。最高音頻範圍為 69.06 ± 0.67 kHz，最低為 59.79 ± 3.13 kHz，特徵音頻為 68.01 ± 0.63 kHz，持續時間為 7.83 ± 1.58 ms (表 1)。

表 1. AnaBat、Pettersson 及 Avisoft 等 3 套蝙蝠偵測器所測量之台灣鼠耳蝠及台灣葉鼻蝠聲音測量值。利用最小顯著性差異測驗檢視 3 系統之錄音狀態，並以此方法將 3 系統之 4 個聲音特徵值比較分群，A、B、C 分別表示具優劣顯著差異的類群

Table 1. Characters of echo calls of *Myotis taiwanensis* and *Hipposideros terasensis* recorded by three ultrasonic detecting systems and grouped by the least significant difference test (LSD) for their maximum frequencies (Fmax), minimum frequencies (Fmin), characteristic frequencies (Fc), and durations of frequencies (Dur)

System	Species	Valid calls	Fmax (kHz) (range)	Fmin (kHz) (range)	Fc (kHz) (range)	Dur (ms) (range)
AnaBat	<i>M. taiwanensis</i>	355	62.10±7.28 ^B (49.84-84.66)	45.95±1.98 ^A (40.71-53.33)	52.89±3.76 ^A (43.96-60.61)	1.38±0.56 ^C (0.60-3.27)
	<i>H. terasensis</i>	143	68.75±0.66 ^C (66.39-70.18)	60.17±3.01 ^B (53.87-68.67)	68.32±1.20 ^A (58.18-69.57)	7.19±1.92 ^B (0.48-10.19)
Pettersson	<i>M. taiwanensis</i>	268	59.63±5.99 ^C (41.50-72.75)	42.81±3.11 ^B (36.13-53.71)	46.11±2.40 ^C (39.30-53.60)	2.01±0.83 ^B (0.91-4.60)
	<i>H. terasensis</i>	190	69.06±0.67 ^B (67.87-69.34)	59.79±3.13 ^B (56.15-67.87)	68.01±0.63 ^B (66.20-68.70)	7.83±1.58 ^A (3.33-9.29)
Avisoft	<i>M. taiwanensis</i>	246	76.73±8.28 ^A (55.67-98.56)	45.69±2.61 ^A (38.85-56.36)	52.19±4.13 ^B (40.20-65.90)	2.81±1.43 ^A (0.81-9.17)
	<i>H. terasensis</i>	244	69.61±0.78 ^A (67.61-71.50)	61.72±2.40 ^A (56.95-69.53)	65.83±1.39 ^C (62.20-71.00)	7.56±1.48 ^A (4.56-12.07)

^A The group with the highest LSD (Fisher's least significant difference) values among three systems.

^B The group with the medium LSD values.

^C The group with the lowest LSD values.

(三) Avisoft 系統

本研究以 Avisoft 系統所錄得台灣鼠耳蝠之可判別音頻檔案共計有 10 個檔案，包含 246 個有效叫聲。最高音頻範圍為 76.73±8.28 kHz，最低為 45.69±2.61 kHz，特徵音頻為 52.19±4.13 kHz，持續時間為 2.81±1.43 ms。所錄得台灣葉鼻蝠之可判別音頻檔案共計有 10 個檔案，包含 244 個有效叫聲。最高音頻範圍為 69.61±0.78 kHz，最低為 61.72±2.40 kHz，特徵音頻為 65.83±1.39 kHz，持續時間為 7.56±1.48 ms (表 1)。

二、音頻圖譜

將測錄後的台灣鼠耳蝠叫聲經由 AnaBat 系統之分類法轉換，並將單一時間點上最強之聲音位點以點標示為聲音圖譜(圖 5)。台灣鼠耳蝠的超音波屬於曲線型(curvilinear)變頻式音波。而以 BatSound Pro 或是 Avisoft-SASLab Pro 經由快速傅立葉轉換(FFT)所記錄的台灣鼠耳蝠回聲定位聲音之聲音圖譜(圖 6)主要為一基本音頻(能量較強、聲紋較深色者)以及一高音和弦(harmonic)。台灣葉鼻蝠的叫聲由 AnaBat 系統分類法轉換後的聲音圖譜，將時間軸上最強之聲音位點以點標示後的聲音圖譜(圖 7)。

台灣葉鼻蝠的超音波包含一常頻音波及末端的降頻音波(即CF-FM型)，而以BatSound Pro或是 Avisoft-SASLab Pro 經由快速傅立業轉換所

記錄的台灣葉鼻蝠超音波聲音之圖譜(圖 8)，主要為一基本音頻(能量較強聲紋較深者)以及一高音和弦。

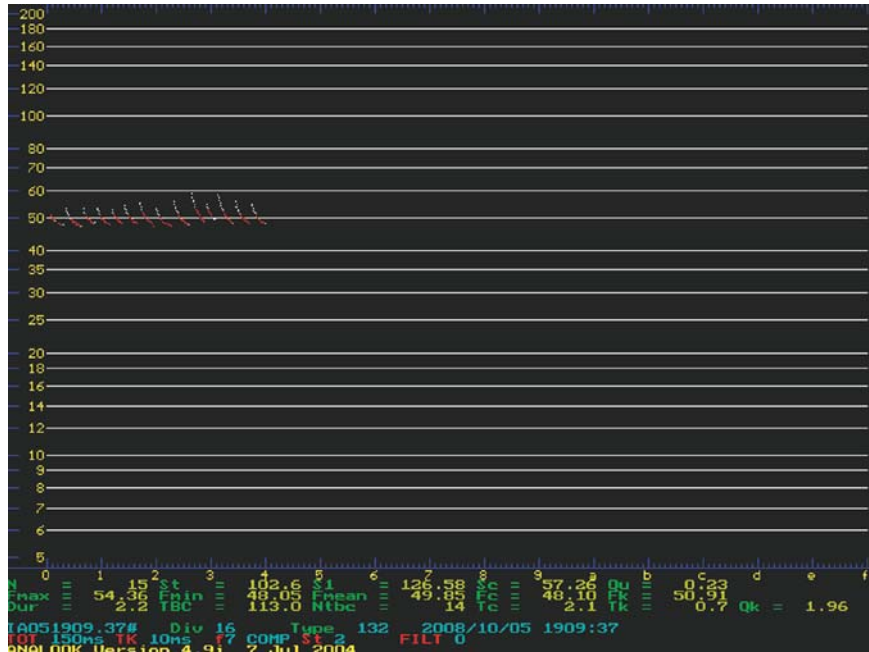


圖 5. 由 AnaBat 系統所測得之台灣鼠耳蝠的超音波圖譜。

Fig. 5. The frequency spectrum of *Myotis taiwanensis* recorded by the AnaBat system.

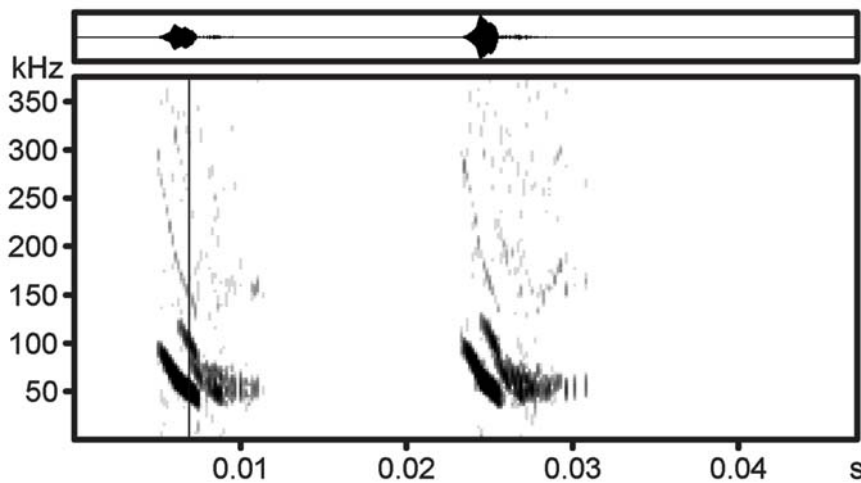


圖 6. 台灣鼠耳蝠經由快速傅立業轉換之超音波圖譜。

Fig. 6. The frequency spectrum of *Myotis taiwanensis* recorded on fast Fourier transfer.

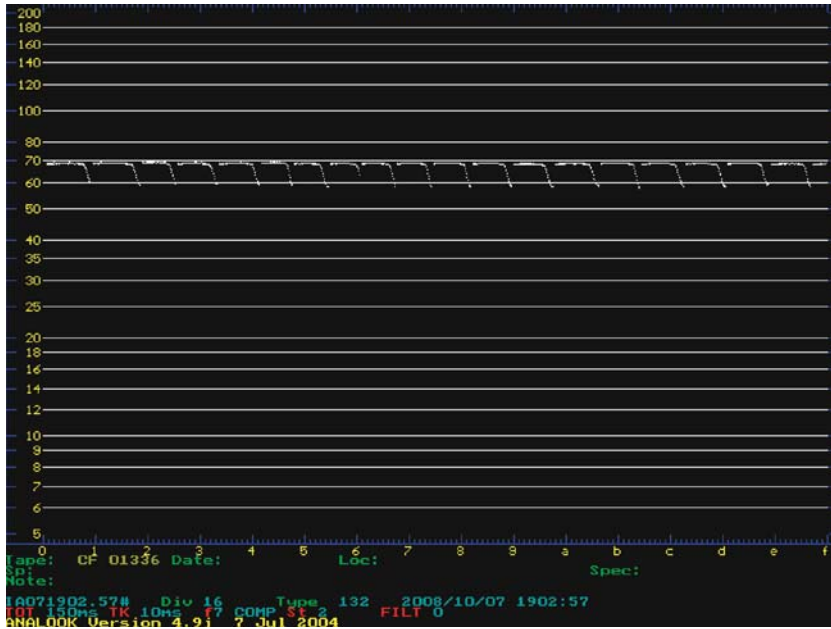


圖 7. 由 AnaBat 系統所測得之台灣葉鼻蝠超音波圖譜。

Fig. 7. The frequency spectrum of *Hipposideros terasensis* recorded by the AnaBat system.

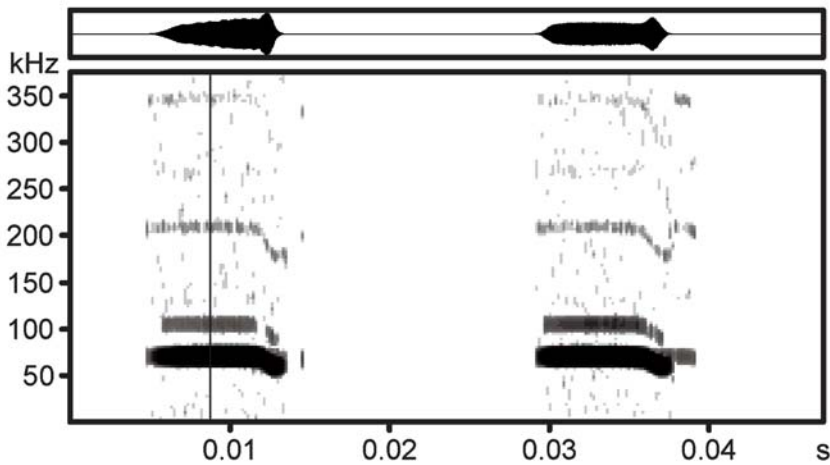


圖 8. 台灣葉鼻蝠經由快速傅立葉轉換之超音波圖譜。

Fig. 8. The frequency spectrum of *Hipposideros terasensis* recorded on fast Fourier transfer.

討 論

一、敏感度及解析度之比較

Schnitzler and Kalko (2001)指出由於不同

種的蝙蝠使用不同的超音波類型，且其體型與覓食策略的不同會導致其回聲定位強度不同。而本研究結果顯示，各系統錄音麥克風之敏感度及用於判定有效蝙蝠音頻的分析軟體之不

同，會導致所判定的有效音頻數及各項音頻特徵測量值具有顯著的差異(表 1)，而這些差異也突顯各套系統對於偵測不同種蝙蝠的超音波類型有其優缺點。利用多變量分析之最小顯著差異分析(Fisher's least significant difference, LSD)顯示變頻式蝙蝠之最高頻率、最低頻率及持續時間等 3 項測量值均以 Avisoft 系統所測得之數值歸為顯著性最大(歸於 A 群)，此表示 Avisoft 系統所測得的結果於統計上皆顯著大於其他二系統，而這個差異也顯示於同狀態下錄音，Avisoft 系統具有較高的解析度。另利用最小顯著差異分析歸類此三系統所測得的特徵音頻則以 AnaBat 系統顯著性最大(歸於 A 群)，此表示 AnaBat 系統對所測得的結果顯著優於另二系統，主要原因來自於特徵音頻為 AnaBat 系統中軟體測量自動判斷回聲定位特徵，其定義為單一音波中最平處(斜率為 0)之頻率值，且點狀音頻特徵較聲紋特徵之判定誤差較小。而 Pettersson 系統於最低音頻及持續時間這 2 項特徵值，以最小顯著差異分析歸類為 3 者之中間(歸於 B 群)，此表示於此二特徵顯著優於 AnaBat 系統，但較 Avisoft 系統略差。於偵測定頻式蝙蝠的結果發現，最高頻率、最低頻率及持續時間等 3 項測量值皆可以發現 Avisoft 系統為 3 型偵測器中最大值(歸為 A 群)，顯著優於其他二系統，而這個差異也顯示於同狀態下錄音，Avisoft 系統具有較高的解析度；特徵頻率則以 AnaBat 系統(歸類為 A 群)顯著大於另 2 套系統；另 Pettersson 系統與 Avisoft 系統的持續時間特徵值並列為 A 群，顯著優於 AnaBat 系統，但 Pettersson 系統於最高頻率及最低頻率皆為三系統之中等解析度(歸為 B 群)，但於特徵音頻顯著優於 Avisoft 系統，亦為三系統之中等解析度。

變頻式蝙蝠之音頻能量及其超音波會因蝙蝠活動於不同的空間及時間而改變(Schnitzler and Kalko 2001)，但相對於變頻式蝙蝠，常頻式蝙蝠之音頻不會因為時空環境而改變其能量

及音頻，是故其音頻較為穩定。針對本研究所使用之 3 套錄音敏感度及解析度之比較分述如下：

(一) 敏感度

蝙蝠變頻式音波之測錄效果以 AnaBat 系統可得到最多筆有效音頻，主要原因在於 AnaBat 系統只要是可接受之蝙蝠叫聲就會以點記錄音波，並無能量過大而導致音頻失真現象。至於另 2 套具有音波能量因子的錄音系統(Pettersson 及 Avisoft 系統)則會有能量過小而導致自動分析軟體判定為無效音頻，抑或能量過大而有失真音頻的現象。因此在變頻型音波蝙蝠偵測上，AnaBat 系統會有較高的錄音敏感度。Fenton *et al.* (2001)比較 AnaBat 與利用快速傅立葉轉換之原理的結果亦發現，AnaBat 系統之麥克風相較其他超音波偵測系統擁有較高的敏感度。蝙蝠定頻式音波雖然具有較穩定的音波能量，但於 AnaBat 系統記錄時若無完整之定頻音頻，則皆不納入音頻分析(圖 2)，以避免因測量最高及最低音頻失真而導致值誤差，是故 AnaBat 在本研究所採用的常頻式蝙蝠中之有效音頻數判定會遠小於其他 2 套系統。相對而言，Avisoft 系統可獲得最多筆常頻式蝙蝠(台灣葉鼻蝠)的有效音頻，而 Pettersson 系統於此 2 類型音波皆屬中等狀態的偵測敏感度。

(二) 解析度

解析度的判定主要來自錄音過程環境雜音的影響程度及有效音頻的判定。AnaBat 系統之有效音頻判定以人工檢視點狀頻譜圖，判定是否為蝙蝠完整之音頻，再予以選定或刪除，而 Pettersson 及 Avisoft 系統則可設定一能量基準值來篩選判定有效音頻。以有效音頻測量值的標準偏差來判斷自動分析及人工篩選有效音頻及測量上的偏差可知，AnaBat 系統的蝙蝠變頻式音波之偏差最小，主要原因應來自變頻式蝙蝠音波因空間不同而發出的音頻所致。AnaBat 系統於人工判定過程會將部分聲音片段判定為不完整音頻而刪除，其餘二系統以能

量因子為判定依據，只要大於此能量閾值即進行測量。蝙蝠常頻式的音波由於音頻能量較為固定，是故於解析度上而言可發現誤差最小之

系統為 Avisoft 系統，而 Pettersson 系統於此 2 類型超音波音頻均屬中等狀態的準確度。

表 2. AnaBat、Pettersson 及 Avisoft 等 3 套蝙蝠偵測器軟硬體功能差異及應用比較
Table 2. Differences in function and application of three ultrasonic detecting systems

Functions	Systems		
	AnaBat	Pettersson	Avisoft
File size	Small	Medium	Large
Frequency response (kHz)	10-200	10-384	10-750
Relative sensitivity	Low	Medium	High
Noise reduce	Medium	Low	High
Compatibility	Low	Medium	High
Convenient	High	Low	Medium
Electric power supply	Low	High	Medium
Recording type	Point	Vocal print	Vocal print
Play back	No	Yes	Yes
Function of software	Weak	Medium	Strong
Personal equation	High	Low	Medium
Applications	Survey and monitoring	Behaviors and ecological study	Behaviors and ecological study
Price	Low	Medium	High

二、系統優勢與缺點

(一) AnaBat 系統與其他 2 套系統之比較

以本研究所測得之 10 筆台灣鼠耳蝠音頻檔案為例，AnaBat 系統以點資料記錄蝙蝠時間軸上最強之音頻，其音頻檔案較小，僅 24.6 kb，而以 Pettersson 系統所測得同樣 10 筆台灣鼠耳蝠之音頻檔案即占了 71.5 Mb (約為 AnaBat 系統檔案大小的 3,000 倍)，而 Avisoft 系統更高達 112 Mb (約為 AnaBat 系統檔案大小的 4,600 倍)。雖然 AnaBat 系統於檔案大小上有顯著的優勢(占相對小之檔案容量)，但根據持續時間及最高音頻之比較可發現當蝙蝠音頻的起始點或是結束點為較微弱的聲音時，AnaBat 系統將會忽略此微弱音頻而導致所測量的資料明顯較其他 2 套系統不完整。然而，對於蝙蝠

的超音波而言，其起始音頻及結束音頻通常是蝙蝠具有特殊生物意義的音頻。另外，AnaBat 系統僅記錄時間點上的最強音頻並以點狀表示 (Partridge 1967; Simmons *et al.* 1979)，因此往往容易忽略掉音頻本身的音頻寬帶(broadband)及可能存在的和弦(Fenton *et al.* 2001)。此外，由於 AnaBat 系統沒有記錄能量因子，僅以單一點記錄單一時間點的能量最強的聲音，因此若處於環境背景聲音吵雜的錄音情況下，例如較高的蟲鳴聲或高音頻電器的雜訊干擾，即無法錄得蝙蝠的聲音；Pettersson 及 Avisoft 系統由於是以聲音檔記錄蝙蝠聲音，所以在吵雜的環境下仍可錄得蝙蝠的聲音。Parsons *et al.* (2000) 認為 AnaBat System 是適合做為蝙蝠類動物普查(survey)時使用的工具，本研究亦有

相同的結論，因為雖然 AnaBat 系統會忽略部分音頻特徵，但其內建的 11 個音頻特徵所歸納出各物種之鑑別能力足以彌補其缺點。此外，AnaBat 系統具有儲存檔案所需容量較小、價格較便宜、麥克風具防水性等特性，對於長期在野外進行調查或監測而言，相較於其他 2 套系統具有其優勢。相對而言，Pettersson 與 Avisoft 系統用於蒐集超音波資訊之麥克風為金屬薄膜，具有高感度錄音功能，而就測錄的音頻範圍而言，二者皆可處理相當高頻的聲音 (10-200 kHz 及 10-384 kHz)，並且可測錄完整、質優、高解析度的聲紋資訊(Parsons *et al.* 2000)，適用於作較精細的蝙蝠聲音學及其相關的行為生態學的研究(李 2007)，惟其可能會受台灣地區的潮濕天氣而影響收音品質，必需特別注意；此外，其價格偏高(約 300,000-500,000 元)，也算是缺點之一。

(二) Pettersson 與 Avisoft 系統比較

Pettersson 系統及其分析軟體 BatSound Pro 皆為設計於測錄分析蝙蝠超音波音頻專用的工具，是故其軟體的使用上會針對蝙蝠可能的音頻特徵作為考量；Avisoft 系統及其分析軟體 Avisoft-SASLab Pro，可因應不同的收音器及設定，測錄分析不同類別生物包含鳥類、鼩鼯、鯨豚，是故其軟體內可以設定不同的測量音頻方式，但若在設定上不瞭解其音頻測量值上的定義，則易誤用所得的測量值。此外，在感度及雜訊抑制方面，Avisoft 系統的表現顯著優於 Pettersson 系統。

(三) 3 套系統與電腦連接的相容性與便利性

AnaBat 系統所需的電腦硬體需求為三系統中最低者，但其所使用的通訊閘口(RS 232)並無與電腦連接的介面，且相容性及便利性均不太理想。本研究採用的 Pettersson D980 與電腦連接時需要連接 1 個訊號過濾器，再接上 1 個快速擷取卡才得與電腦連接，而且不僅 D980 本身需要電源，訊號過濾器亦需要電源供應，雖快速擷取卡支援熱插拔，但其連接性

及相關外露線材在野地操作，皆會對偵測器與電腦的通訊造成影響，而導致無法錄音。另外，Avisoft 系統將快速擷取卡及訊號過濾器整併為一體，且其為 USB 介面，因此是 3 套系統中與電腦連接性與相容性都屬最好的一個系統。

不同的蝙蝠超音波偵測系統有其不同的功用及優缺點，3 套蝙蝠偵測套裝系統之軟硬體及原理比較請參照表 2。本研究建議，AnaBat 系統僅需要一小尺寸快閃記憶體及提供 AnaBat 系統的電池即可在野地進行蝙蝠超音波的偵測與錄音工作，可謂相當便利；相對而言，若欲進行野地的長期監測及調查，Avisoft 系統及 Pettersson 系統所需的電腦記錄配備及其所需大量的儲存容量，對於野地調查將是一個很大的負擔。然而，對於蝙蝠的聲音學及行為生態研究而言，由於 AnaBat 的原理及特性所忽略的部分可能是重要的音頻特徵，導致訊息資訊不全，而 Pettersson 與 Avisoft 系統的高感度錄音功能則具有其優勢。因此必需視研究者的不同需求及研究目的而選用不同的蝙蝠偵測系統。此外，錄音品質與環境狀況亦有顯著的相關性，若欲錄得一個好的聲音檔案則需避免周邊任何的高頻音影響，如電器、蟲鳴音、水流聲等因素，而這部分 Pettersson 與 Avisoft 系統的表現較佳。最後，本研究比較之 3 套系統之有效音頻判定及音頻特徵的測量皆需倚賴研究人員的精準判定，是故研究人員對於蝙蝠超音波的認知與操作熟悉度，以及對音頻特徵的判定經驗亦將是運用蝙蝠超音波偵測系統進行研究成功與否重要關鍵之一。

謝 誌

感謝行政院農業委員會特有生物研究保育中心提供經費和儀器的協助，以及特有生物研究保育中心動物組黃光隆及張鈞翔於野外錄音上的協助，感謝台南縣東山鄉仙湖農場於錄音

過程中的協助。

引用文獻

- 林良恭、李玲玲、鄭錫奇。2004。台灣的蝙蝠（再版）。國立自然科學博物館。台中。台灣。177 頁。
- 李秉容。2007。台灣葉鼻蝠回聲定位叫聲的避免干擾反應。國立台灣大學生態學與演化生物學研究所碩士論文。64 頁。
- 周政翰、李秉容。2006。淺談 AnaBat 和 Pettersson 蝙蝠超音波偵測系統的優缺點。野生動物保育彙報與通訊 (NOW)。國立屏東科技大學野保所發行。第十卷第二期：35-36 頁。
- 趙念民。2001。利用回聲定位叫聲特性鑑別東亞家蝠、摺翅蝠、台灣葉鼻蝠和台灣小蹄鼻蝠之研究。國立中山大學生物學研究所碩士論文。64 頁。
- 鄭錫奇、張簡琳玟。2008。台灣蝙蝠的多樣性、研究現況與度冬遷移推論。2008 蝙蝠研究研討會論文集。台灣蝙蝠學會主辦。5-15 頁。
- 鄭錫奇、周政翰。2007。台灣地區食蟲性蝙蝠超音波資料庫之建置與應用。野生動物保育與研究學術研討會論文集。199-204 頁。
- 盧道杰。1988。竹東地區東亞家蝠活動模式之研究。國立台灣大學動物學研究所碩士論文。64 頁。
- Fenton, M. B., S. Bouchard, M. J. Vonhof and J. Zigouris. 2001. Time-expansion and zero-crossing period meter systems present significantly different views of echolocation calls of bats. *Journal of Mammalogy* 82: 721-727.
- Kunz, T. H. and S. K. Robson. 1995. Postnatal growth and development in the Mexican free-tailed bat (*Tadarida brasiliensis mexicana*): Birth size, growth rates, and age estimation. *Journal of Mammalogy* 76: 769-783.
- Kingston, T., G. Jones, A. Zubaid and T. H. Kunz. 2003. Alternation of echolocation calls 5 species of aerial-feeding insectivorous bats from Malaysia. *Journal of Mammalogy* 84: 205-215.
- Partridge, G. R. 1967. A high-speed transient analyzer. *Journal of the Audio Engineering Society* 15: 171-175.
- Parsons, S., A. M. Boonman and M. K. Obrist. 2000. Advantages and disadvantages of techniques for transforming and analyzing chiropteran echolocation calls. *Journal of Mammalogy* 81: 927-938.
- Simmons, J. A., M. B. Fenton, W. R. Ferfuson, M. Jutting and J. Palin. 1979. Apparatus for research on animal ultrasonic signals. *Life Science Miscellaneous Publications, Royal Ontario Museum*. p.1-31.
- Schnitzler, H. U. and E. K. V. Kalko. 2001. Echolocation by insect-eating bats. *Bioscience* 51: 557-569.