

החברה להגנת הטבע
מרכז מידע לעופות דורסים



העזניה

עלון מס' 5, כסלו תשמ"ג, דצמבר 1982



חוש השמיעה של התנשמת

ERIC I. KNUDSEN

תורגם לעברית על ידי אסתר (קוקי) לחמן מתוך:

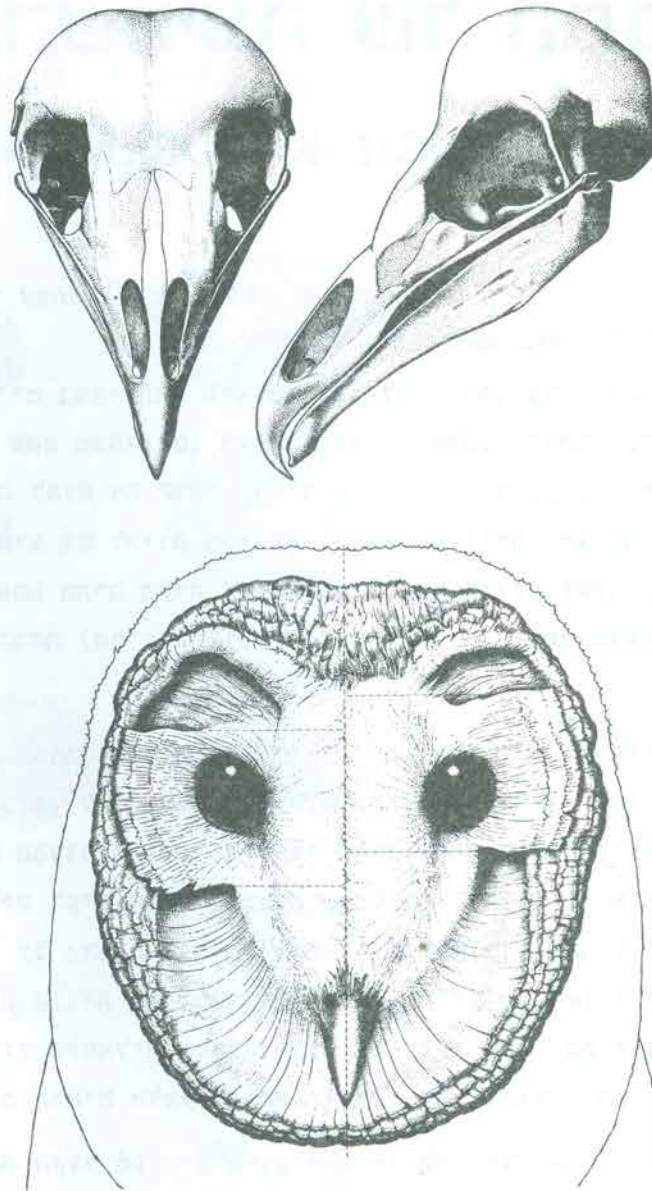
SCIENTIFIC AMERICAN, December 1981, 245 No. 6.

חייה של התנשמת תלויים בשמיעתה. היא צדה בלילה, ולכן עליה לאתר את עכברי השדה רק בעזרת הרישורשים שהם משמיעים. בעברם בשלג ובעשב. בדומה לטורפים הצדים על פני הקרקע, חייבת התנשמת למקם את טרפה במהירות ובדייקנות במישור האופקי. מכיון שהציפור צדה מהאוויר, חייבת היא גם להיות מסוגלת לקבוע את זווית ההגבהה שלה מעל בעל החיים שאותו היא צדה. התנשמת פתרה בעיה זו בהצלחה: היא יכולה לאתר קולות באזימוט (המימד האופקי) ובהגבהה (המימד האנכי) בצורה הטובה ביותר בהשוואה לכל בעלי החיים האחרים שנבדקו.

מה גורם לדיוק זה? התשובה טמונה ביכולתה של התנשמת לנצל הבדלים זעירים בין הקולות הנקלטים באוזנה הימנית, לבין אלה הנקלטים באזנה השמאלית. האוזניים נמצאות, בדרך כלל, במרחקים שונים ממקור הקול, כך שגלי הקול מגיעים אליהן בזמנים שונים. התנשמת רגישה במיוחד להבדלים דקים אלו, ומנצלת אותם כדי לקבוע את אזימוט הקול. נוסף לכך, הקול נשמע חזק יותר על ידי האוזן הקרובה יותר למקורו, והבדל בעוצמת הקול עוזרים לתנשמת בהגדרת הגובה הודות לאסימטריה מיוחדת באוזניה. האוזן הימנית ופתחה מכווננים מעט כלפי מעלה; האוזן השמאלית ופתחה מכווננים כלפי מטה. כתוצאה מכך, רגישה יותר האוזן הימנית לקולות הבאים מלמעלה והאוזן השמאלית לקולות הבאים מלמטה.

ההבדלים בזמן ובעוצמת הקול מספקים מידע המאפשר לציפור לאתר בדייקנות קולות אופקיים ואנכיים. כדי שמידע זה יהיה שימושי לתנשמת, הוא חייב להיות מאורגן ומפורש. רוב העיבוד נעשה במרכזים מוחיים קרובים לתחילת המסלול השמיעתי. ממרכזים אלו עוברים הדחפים העצביים למערכת נוירונים במוח האמצעי, המסודרים בצורת מפת חלל תלת מימדית. כל נוירון במערכת מגורה רק על ידי קולות מאזור אחד קטן של החלל. ממבנה זה מועברים האימפולסים למרכזים מוחיים גבוהים יותר. בחירת האותות התחשתיים והפיכתם למפת חלל, היא המאפשרת לתנשמת למקם את טרפה בחשיכה מוחלטת ובדיוק מופלא.

לתנשמת תפוצה רחבה, תנשמות נמצאות בכל האזורים הטרופיים והממוזגים של העולם. רבות מהן שוכנות בקרבת יישובי אדם, ולעיתים קרובות מקננות באסמים ובמגדלי פעמונים; הן גם מקננות בעצים חלולים בחורים בסלעים ובסוללות אדמה. בדומה לדורסי לילה רבים אחרים, הקשר בין בני הזוג נשמר לזמן רב, לעתים למשך כל חייהם. בני הזוג. התנשמות חוזרות לקנן באותו מקום מדי שנה. הן צדות באזורים פתוחים ומכסות שטח



ציור מס. 1

למבנה פרצופה של התנשמת תפקיד מכריע בשמיעתה המעולה. הפרצוף מורכב משורות צפופות של נוצות, הנקראות "זר הפנים" והן המתמשכות מהגולגולת הצרה יחסית. "האוזניים" החיצוניות" הן תעלות הנוצרות על ידי הזר, יורדות לאורך הפרצוף ונפגשות מתחת למקור. הן אוספות קולות ומבקזות אותם לתוך פתחי תעלת השמע, המוסתרים מתחת לקפלים הקדם אוזניים (קפלי עור הבולטים כלפי חוץ ליד העיניים). האוזן השמאלית רגישה יותר לקולות בתדירות נמוכה משמאל והאוזן הימנית לאלה שמימין. לעומת זאת בתדירות גבוהות רגישה האוזן הימנית יותר כלפי מעלה, מכיון שהקפל הקדם-אוזני ופתחו נמוכים יותר בימין, והתעלה מוטית כלפי מעלה. הפתח והקפל גבוהים יותר מצד שמאל והתעלה מוטית כלפי מטה. האוזן השמאלית רגישה יותר לקולות הבאים מלמטה. הבדלים בעצמה המורגשת עשויים אם כך, לספק רמזים לגבי גובה מקור הקול בנוסף לאלו של כוונת האופקי.

רחב יותר מכל ציפור לילית אחרת. חקר צנפות התנשמת הראה שיותר מ-95% מטרף התנשמות מורכב מיונקים קטנים, בעיקר מכרסמים; והיתר מדו-חיים ומצפורים אחרות. התנשמת (*Tyto alba*) היא הנפוצה מבין תשעת מיני התנשמות הנפוצות בעולם. יש המשייכים אותן למשפחה נפרדת - ה- *Tytonidae*. גובהה של התנשמת נע בין 30 ל-45 ס"מ, והיא בעלת פרצוף לבן, גב חום בהיר וחזה חום בהיר על רקע לבן; חלקיה התחתונים רובם לבנים עם כתמים כהים. לכל אחד מאצבעותיה האמצעיות מסרק קטן שבעזרתו היא מסדרת את נוצותיה.

הגולגולת צרה וקטנה יחסית, לעומת הפנים הגדולים והעגולים. מבנה הפרצוף חשוב ביותר באיתור הטרף, והוא מורכב משכבות של נוצות קשוחות ועבות המסודרות בשורות צפופות. המבנה המנוצה, המכונה "זר הפנים" (*facial ruff*) יוצר שטח מחזיר יעיל מאד של קולות בתדירות גבוהה.

שני מרזבים עוברים דרך "זר הפנים" מהמצח ללסת התחתונה, רוחבו של כל אחד מהם כשני ס"מ ואורכו תשעה ס"מ, המרזבים דומים בצורתם לאפרכסת הבשרית החיצונית של האוזן האנושית, וממלאים את אותו תפקיד: אסוף קולות בתדירות גבוהה מנפח גדול של חלל ורכוזם לתעלות האוזניים. המרזבים נפגשים מתחת למקור, אבל מופרדים מעליו על ידי רכס נוצות עבה. פתחי האוזניים עצמם מוסתרים תחת קיפולים קדם-אוזניים; שני קיפולי עור, הבולטים הצידה סמוך לעיניים. המבנה המסובך הזה מוסתר כולו תחת שכבה של נוצות דקות במיוחד שקופות מבחינה אקוסטית. התכונות האקוסטיות של "זר הפנים" קשורות באופן הדוק ביכולתה של התנשמת למקם את מקור הקול.

התנשמת חייבת להיות מסוגלת לאתר טרף בעזרת קולות בלבד. קשה לראות עכברי שדה למיניהם גם בשעות היום, מכיון שצבעם מתמזג היטב עם צבעי הסביבה; נוסף לכך נוטים הם להסתובב במנהרות בעשב ובשלג. בלילה כאשר מחפשים המכרסמים מזון הם, למעשה, בלתי נראים גם לעיניו החדות של דורס לילה. ציד מהאוויר מקשה על הדורס עוד יותר, כי עליו לקבוע את זווית ההגבהה מעל לטרף. קביעת האזימוט בלבד היתה משאירה שורה שלמה של אפשרויות למטרה שבקרקע למטה.

התנשמת מאתרת קולות בשני מימדי חלל בדיוק רב. רוג'ר ס. פיין, ומאוחר יותר מ. קונישי ואני הראינו, שהציפור מסוגלת למצוא את מקור הצליל בדיוק של מעלה אחת או שתיים באזימוט ובהגבהה; מעלה אחת היא בערך רוחב אצבע קטנה במרחק של זרוע. באופן מפתיע, עד שנחקרה התנשמת, היה ידוע האדם כמין בעל הכושר הטוב ביותר לאתר מקור קול. עתה מתברר כי האדם מסוגל לדייק באתור אזימוט מקור הקול בערך כמו התנשמת אך הוא גרוע פי שלושה מהתנשמת באתור מקור הקול בהגבהה. נבדקו גם קופים וחתולים, הנחשבים לבעלי חיים בעלי שמיעה מעולה. מן המחקר התברר כי כושרה של התנשמת באתור מקור הקול במימד הרחבי עולה פי ארבעה על זה של הקופים והחתולים.

רגישות השמיעה של התנשמת מודגמת גם על ידי יכולתה לאתר קולות רחוקים וגם על ידי

יכולתה לכוון את טפריה לדריסתו הסופית של הטרף. כאשר נוחתת התנשמת על מכרסם, גם בחדר חשוך לחלוטין מסדרת היא מיד את טרפיה במקביל לציר גופו של העכבר. פיין הוא הראשון שטען, שהתנהגות זו אינה מקרית. כאשר העכבר פונה ורץ בכוון אחר, שבה התנשמת ומסדרת את כוון טפריה בהתאם. התנהגות זו מגבירה את הסיכויים לדריסה מוצלחת; מהתנהגות זו מסתבר, שלא רק שהתנשמת מזהה את מקור הקול בדיוק רב, אלא שהיא גם מבחינה בשינויים מזעריים במקור הקול, ומהם היא לומדת על כוון התנועה של הטרף.

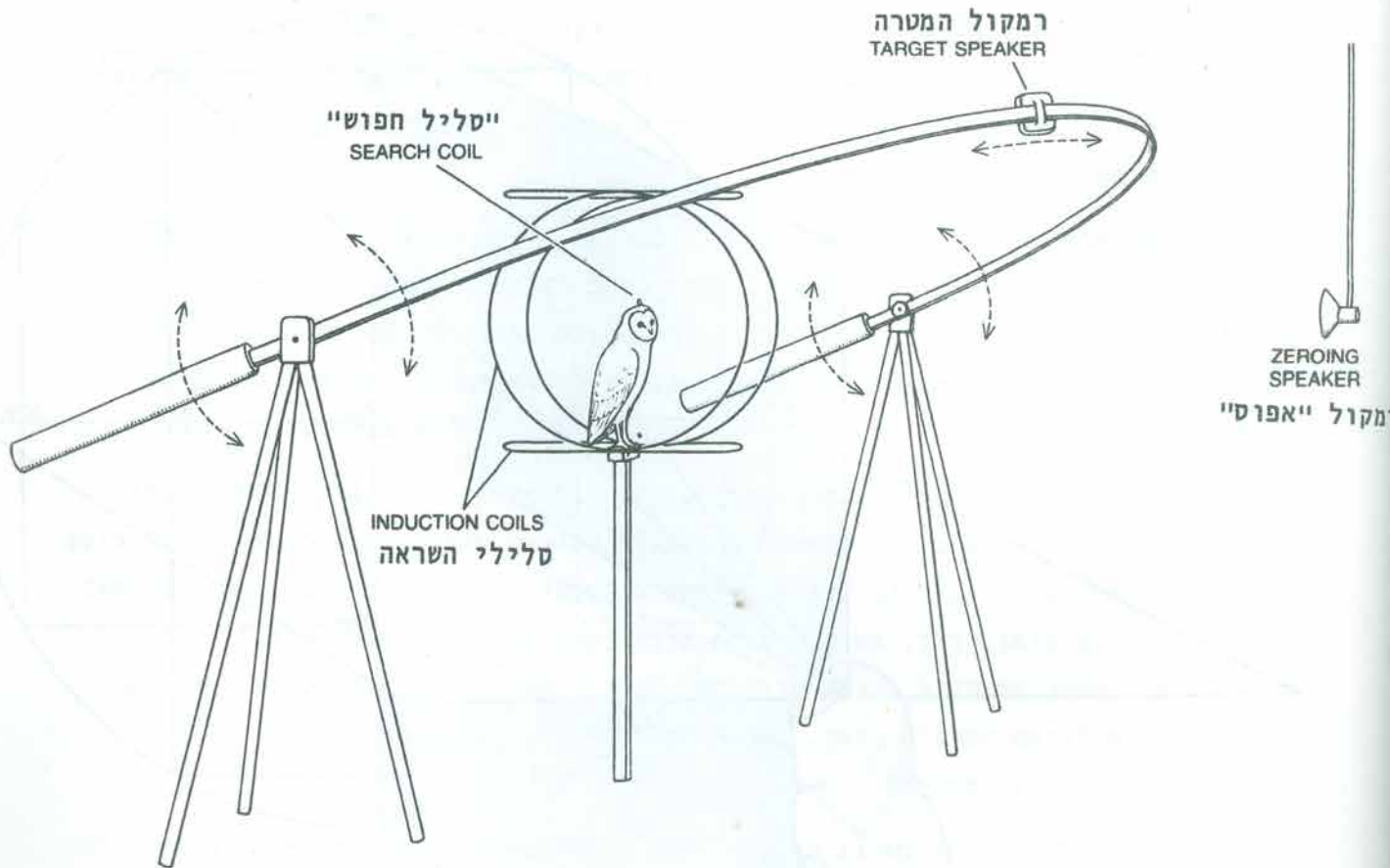
מספר ניסויים הבהירו כיצד מסוגלת התנשמת לבצע מלאכת ציד מסובכת זו. ניסויים עם עופות בתעופה חופשית מדדו באיזה דיוק עפה התנשמת לכוון מקור קול בלתי נראה. ניסויים עם כווי-ראש, שבהם עמדה הציפור על מעמד נסוי, עזרו למדוד באופן מדויק כיצד היא מכוונת את ראשה לקול נכנס. בניסויים שבהם נגעו במיקרואלקטרודה במוחה של תנשמת שהורדמה הראו איך התארגן והתפרש המידע התחושי על ידי מערכת העצבים המרכזית, כאשר הצפור נחשפה לקולות שונים.

בצענו סדרה של ניסויים לבדיקת הטיית ראשה של התנשמת לעבר מקורות הקול. למערכת זו מספר יתרונות על ניסויים הנערכים בתעופה חשפית. בניסויים בתעופה חופשית ניתן לבלבל בין טעויות תעופה לבין טעויות באיתור קולות. נוסף לכך אין אפשרות לקבוע את זווית מקור הקול ביחס לראש הציפור, באותו רגע שהציפור מחליטה לדרוס. ניסיונות בתעופה חופשית הם גם מסובכים ועורכים זמן רב. בהשוואה, לניסוי התעופה, פשוטים יחסית ניסויי הטיית הראש לביצוע, ומאפשרים מדידת היחס בין הראש ובין מקור הקול.

ניסויים אלה מצילים תגובה טבעית של התנשמת כשהיא צדה. כאשר התנשמת שומעת רעש, היא מפנה את ראשה בתנועה מהירה, המביאה את מקור הקול ישירות לפניה. תנועה זו מביאה את הקול לאזור שבו שמיעת הציפור חדה ביותר. מכיון שעניי התנשמת הן קבועות, מאפשרת תנועה זו לציפור לראות את הטרף בחדות המירבית. עקבנו אחרי התנהגות זו על ידי הלבשת סליל קל על ראש התנשמת. השדות המגנטיים, שנוצרו על ידי סלילים נוספים, רוכזו כך שכאשר הציפור עמדה באופן נורמלי היה סליל החיפוש שעל ראש התנשמת בנקודת הצטלבות של השדה האופקי והשדה האנכי. הזרם החשמלי שהושרה בסליל החיפוש השתנה בהתאם לכוונו ביחס לשדות האלו. על ידי הערכת עוצמתם של שני האותות הניתנים לאבחנה, אפשר למדוד את המרכיבים האופקיים והאנכיים של כוון ראש התנשמת.

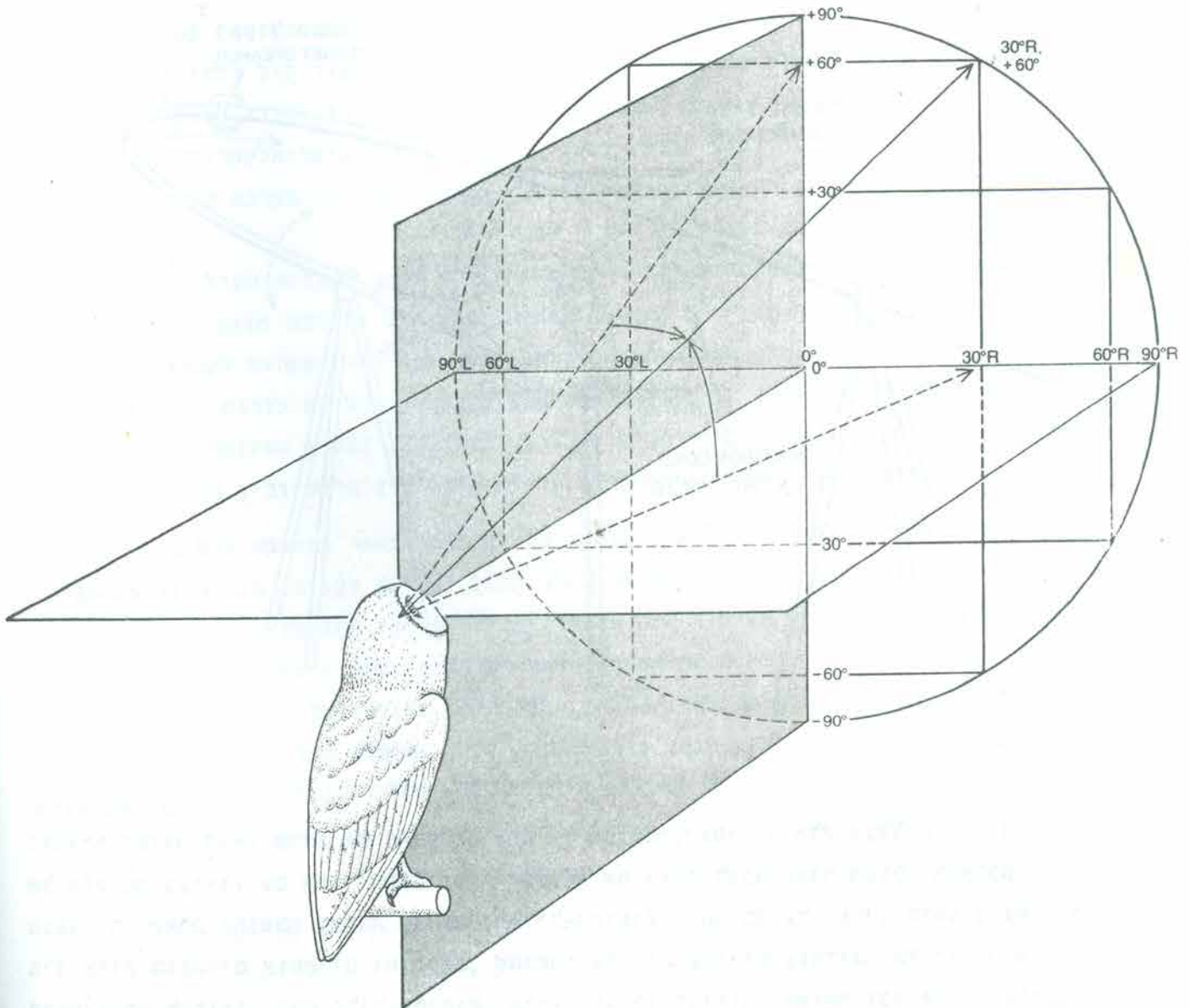
הניסויים בוצעו בחדרים חשוכים לגמרי, שרופדו בחומרים מבודדים, המונעים הדים. קולות נוצרו על ידי רמקול נייד (רמקול ה"איפוס") ורמקול נייד (רמקול "המטרה"). תחילה פנתה התנשמת לכוון קול שבקע מרמקול האיפוס, שמוקם ישר לפני עמדת התנשמת. קול שהושמע על ידי רמקול המטרה גרם לתנשמת להפנות את ראשה בתנועה מהירה אופיינית. מחשב בקר את מיקום רמקול המטרה ורשם את מיקומו ואת כוון ראש התנשמת.

מניסויי הטיית הראש למדנו רבות על כושרה של התנשמת לאתר את מקור הקול. תכונה חשובה בתהליך זה היא יכולתה של התנשמת להשיג דיוק מירבי באתור קולות הנאלמים לפני



ציור מס. 2

ניסויי הטיית הראש מדדו את דיוק שמיעתה של התנשמת. ניסויים אלה מנצלים תגובה טבעית של התנשמת בצייד: עם אתור הקול מפנה התנשמת את ראשה לעבר מקור הקול. במערכת הנסויית נשארה התנשמת בעמדה קבועה. "סליל-החיפוש" שהורכב על ראשה, הושם בהצטלבות בין שדות מגנטיים אופקיים ואנכיים, שהושרו על ידי סלילים עומדים. כל תזוזה של הראש גרמה לשינוי בזרם סליל החיפוש, שינוי הניתן למדידה. תשומת לב של התנשמת כוון תחילה לקול שבקע מרמקול "איפוס" יציב. קול מרמקול "מטרה" נייד גרם לציפור לסובב את ראשה במהירות. מחשב ביקור את מיקום רמקול המטרה וחשב תנועות ראשה של התנשמת. בצורה כזאת ניתן למדוד את הדיוק, שבו הגיבה התנשמת לקולות שבקעו מעמדות שונות במרחב.



ציור מס. 3

מערכת צירים כפולה משמשת למיפוי עמדות ראשה של התנשמת בניסויי הטיית הראש. כל כוון מצויין על ידי שתי מדידות: הזווית האופקית והזווית האנכית, בהן חייבת התנשמת לסובב את ראשה כדי לפנות לכוון זה. כאשר היא פונה קדימה, כפי שעושה הציפור בדרך כלל, הכיוון הוא 0 מעלות (אופקי) ו-0 מעלות (אנכי). המפה מייצגת 180 מעלות של החלל המרחבי שלפני התנשמת. המפות האחרות המופיעות בכתה זו הן בעלות אותה מערכת צירים.

שתנועות הראש מתחילות. מכאן ניתן להסיק שמערכת השמיעה של התנשמת קובעת את האזימוט וההגבהה של הקול ללא תנועת הראש, ורק אחר כך מנצלת את המידע כדי לכוון את תגובת הכוונת הראש. מבדקי תנועת הראש מראים גם, שמידת הדיוק יורדת ככל שגדלה הזווית בין מקור הקול וכוון ראש הצפור.

נסיונות שונים הראו, שיכולת התנשמת לאתר את מקור הקול תלויה בנוכחותן של תדירויות גבוהות בקול, למרות ששמיעת התנשמת רגישה לתחום רחב של תדירויות, מ-100 הרץ (מחזוריים לשניה) עד 12.000 הרץ, היא מאתרת בדייקנות רק קולות בתדירויות הנעות בין 3,000-9,000 הרץ. בנסויים שבהם נסתמה אוזן אחת של הציפור, הוכח שהתנשמת זקוקה לשתי האוזניים לאיתור מדויק של מטרות. אם סותמים אוזן אחת מופיעות טעויות גדולות בכוון אותה האוזן.

התכונות המתוארות הן בסיס להמשך מחקרנו לבדיקת המידע המדויק שהתנשמת בוררת מתוך מגוון הקולות בטבע. כדי לאתר את מקור הקול חייבת התנשמת לקבוע את כוון השדור של גלי הקול ולהתבסס על קליטתו משתי נקודות, כלומר אוזניה. המידע המרחבי השימושי ביותר מושג על ידי השוואת המידע, משני המקורות הללו. מכיון שההבדלים ביניהם אינם תלויים ברמה המוחלטת של הקול אלא רק בהכוונת האוזניים בשדה הקול.

רמז אחד חשוב מסוג זה מהווה ההבדל בזמן הגעת הקול אל שתי האוזניים. כאשר הקול מגיע מהצד - ההבדל הוא מירבי; כאשר הקול מגיע ישירות מחזית הציפור, אין הבדל בזמן ההגעה לשתי האוזניים. בין גבולות אלו משתנים הפרשי הזמן בהתאם לזווית הקול במישור האופקי. העירוב בזמן יכול, אם כך, לספק מידע בקשר לאזימוט הקול. אין די בכך כדי שהציפור תאתר את הקול בצורה מדויקת, מכיוון שקולות שמקורם מכוונים שונים עשויים לגרום לאותם הפרשים בזמן. במרחב התלת-מימדי יוצרים הכוונים האלה קונוס סביב הציר בין אוזני התנשמת.

זאת דוגמא לכך, שרמז אחד לא די בו כדי לספק אינפורמציה על הזווית האופקית והאנפית של מקור קול. כדי להגדיר מקום בשני מימדים דרושים שני אותות בלתי תלויים. אצל התנשמת המידע הנוסף מסופק על ידי הבדלים ברגישותם הכוונית של האוזניים.

הרגישות הכוונית מסופקת על ידי "זר הפנים" (facial ruff), המשמש בתפקיד דומה לזה של יד, המטה את אפרכסת האוזן כדי להיטיב ולשמוע. המרזבים בזר הפנים מגבירים את הקול, ועושים את האוזן רגישה יותר לקולות מכוונים מסויימים. מידת ההגברה, והרגישות הכוונית המסופקת על ידי נוצות "זר הפנים", משתנה בצורה קיצונית עם תדירות הקול. תופעה זו קורה הודות לתנועה של גלי הקול עצמם. כאשר גלי קול פוגעים בעצם הם מסוגלים לזרום סביבו או להיות מוחזרים ממנו. אם אורך הגל ארוך בהשוואה לעצם, נוטים הגלים להתפשט סביבו; אם אורך הגל קצר נוטים הגלים להיות מוחזרים באותו כוון ממנו באו. כתוצאה מתופעה זו, תדירויות של גלי קול הפחותות מ-3.000 הרץ אינן מוחזרות ביעילות על ידי "זר הפנים" מכיוון שהפעילות המשפכים של האוזן

תלויה ביכולתה להחזיר קולות, רגישותה הכיוונית בתדירויות נמוכות נמוכה יחסית. ב-3.000 הרץ למשל, רגישה האוזן השמאלית רק במעט יותר לקולות הבאים מהתחום שבין 20 ל-40 מעלות שמאלה, מאשר לקולות הבאים מכוונים אחרים. לאוזן ימין דרגת רגישות דומה ימינה. מכיוון שהרגישות של כל אוזן בתדירויות נמוכות משתנה רק בהדרגתיות עם הכוון, יכולה השוואת עצמות קול בתדירויות נמוכות לספק אות מרחבי גס בלבד. נוסף לכך, הבדל זה אינו מספק רמזים באשר לגובה הקול.

המצב שונה לחלוטין בגלי קול בתדירות גבוהה יותר. כל אוזן רגישה הרבה יותר לכוון הקול, שינוי קטן בכוון הקול גורם לשינוי גדול בעצמה המורגשת. בנוסף לזאת במקום שתהיה לה רגישות יתר לצד ימין או שמאל, רגישה אוזן ימין יותר מעל מישור אופקי ואוזן שמאל רגישה יותר מתחתיו. הרגישות היא תוצאה של אסימטריה אנטומית בלתי רגילה. "זר הפנים" בצד השמאלי מכוון קצת כלפי מטה, האוזן והקפל הקדם-אוזני מוגבהים יותר בצד שמאל, בצד ימין המצב המצב הפוך. בהתאם למתואר, כאשר עולה צלילו של מקור הקול נעשים המרכיבים בתחום התדירות הגבוהה של הקול הטבעי חזקים יותר באוזן ימין וחלשים יותר באוזן שמאל. כאשר יורד צלילו של מקור הקול מתחזקים הקולות באוזן שמאל. כיוון שבתדירויות גבוהות משתנה העצמה המורגשת במהירות עם הגובה, מספק אות זה אינפורמציה מדויקת ביותר.

מידע זה, למרות היותו חשוב לתנשמת, הוא גם מסובך מאד. גודל ההפרש בעצמה משתנה לפי תדירות הקול הודות ליכולתן המוגברת של "זר הפנים" להחזיר קולות בתדירויות גבוהות. הכוון המצויין משתנה גם הוא עם התדירות, מכיוון שמיקום אופקי ניתן על ידי התדירויות הנמוכות ומיקום אנכי על ידי התדירויות הגבוהות. מערכת השמיעה של התנשמת חייבת, אם כך, להשוות את העוצמות הנקלטות בכל אוזן עבור כל תדירות. השוואת עצמות לפי תדירויות נקראת ספקטרום בין-אוזני.

מאחר שקולות בתדירות נמוכה נותנים רמזים לאזימוט ואלה שבתדירות גבוהה - רמזים לגובה, מסוגל הספקטרום הבין-אוזני לספק לעצמו אינפורמציה טובה לתנשמת לאיתור הטרף. ראיות רבות תומכות בהיפותזה, שדורסי לילה מנצלים ספקטרום זה. דיוק הפגיעה של התנשמת עולה בתלילות ככל שמספר התדירויות הכלולות בקול גדל. מההבדלים בעצמה של טון בודד (קול בעל תדירות בודדת) יכולה התנשמת לקבוע כוון במימד אחד בלבד; ככל שמתרחב הספקטרום מופיעים הבדלי עצמה רבים יותר, המצביעים על זווית המקור ביותר ממישור אחד. נסויים. שבהם נסתמה אוזן אחת של התנשמת, מראים באופן ישיר יותר, שהיא משווה עצמות. תנשמת מאולפת, לה סתמו את אוזנה הימית, נחתה לדריסה משמאל למטה; כאשר סתמו את אוזן שמאל היא נחתה ימינה למטה.

אישור נוסף לכך הושג על ידי הורדת "צוארון הפנים" של התנשמת. כאשר הוא מורד מסוגלת התנשמת לאתר את אזימוט הקול בצורה טובה, אך אינה יכולה לאתר את מקומה האנכי; הציפור מכוונת את עצמה כל הזמן לנקודה אופקית, בלי להתיחס לגובה מהטרה; תופעה זו

תלויה ביכולתה להחזיר קולות, רגישותה הכיוונית בתדירויות נמוכות נמוכה יחסית. ב-3.000 הרץ למשל, רגישת האוזן השמאלית רק במעט יותר לקולות הבאים מהתחום שבין 20 ל-40 מעלות שמאלה, מאשר לקולות הבאים מכוונים אחרים. לאוזן ימין דרגת רגישות דומה ימינה. מכיוון שהרגישות של כל אוזן בתדירויות נמוכות משתנה רק בהדרגתיות עם הכוון, יכולה השוואת עצמות קול בתדירויות נמוכות לספק אות מרחבי גס בלבד. נוסף לכך, הבדל זה אינו מספק רמזים באשר לגובה הקול.

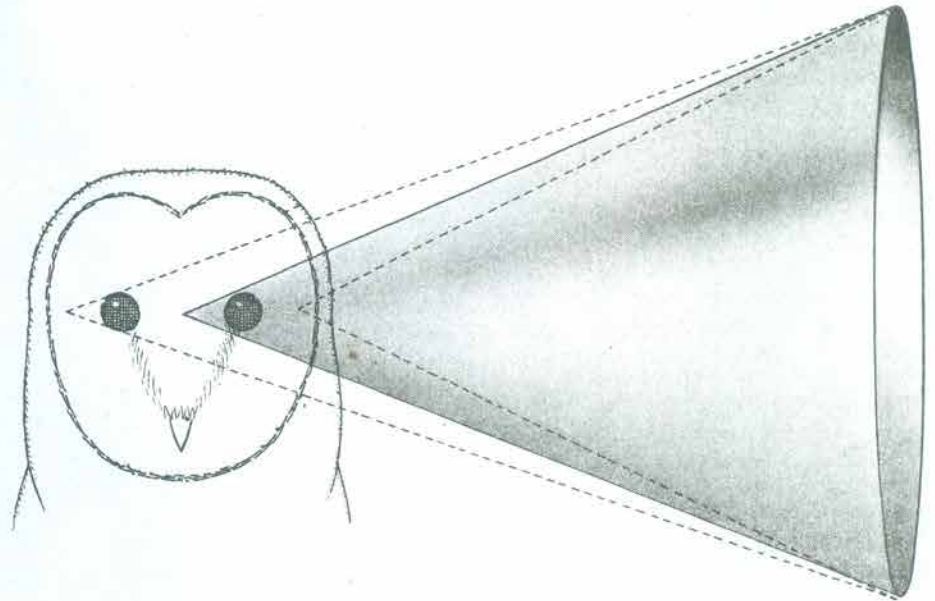
המצב שונה לחלוטין בגלי קול בתדירות גבוהה יותר. כל אוזן רגישה הרבה יותר לכוון הקול, שינוי קטן בכוון הקול גורם לשינוי גדול בעצמה המורגשת. בנוסף לזאת במקום שתהיה לה רגישות יתר לצד ימין או שמאל, רגישה אוזן ימין יותר מעל מישור אופקי ואוזן שמאל רגישה יותר מתחתיו. הרגישות היא תוצאה של אסימטריה אנטומית בלתי רגילה. "זר הפנים" בצד השמאלי מכוון קצת כלפי מטה, האוזן והקפל הקדם-אוזני מוגבהים יותר בצד שמאל, בצד ימין המצב המצב הפוך. בהתאם למתואר, כאשר עולה צלילו של מקור הקול נעשים המרכיבים בתחום התדירות הגבוהה של הקול הטבעי חזקים יותר באוזן ימין וחלשים יותר באוזן שמאל. כאשר יורד צלילו של מקור הקול מתחזקים הקולות באוזן שמאל. כיוון שבתדירויות גבוהות משתנה העצמה המורגשת במהירות עם הגובה, מספק אות זה אינפורמציה מדויקת ביותר.

מידע זה, למרות היותו חשוב לתנשמת, הוא גם מסובך מאד. גודל ההפרש בעצמה משתנה לפי תדירות הקול הודות ליכולתן המוגברת של "זר הפנים" להחזיר קולות בתדירויות גבוהות. הכוון המצויין משתנה גם הוא עם התדירות, מכיוון שמיקום אופקי ניתן על ידי התדירויות הנמוכות ומיקום אנכי על ידי התדירויות הגבוהות. מערכת השמיעה של התנשמת חייבת, אם כך, להשוות את העוצמות הנקלטות בכל אוזן עבור כל תדירות. השוואת עצמות לפי תדירויות נקראת ספקטרום בין-אוזני.

מאחר שקולות בתדירות נמוכה נותנים רמזים לאזימוט ואלה שבתדירות גבוהה - רמזים לגובה, מסוגל הספקטרום הבין-אוזני לספק לעצמו אינפורמציה טובה לתנשמת לאיתור הטרף. ראיות רבות תומכות בהיפותזה, שדורסי לילה מנצלים ספקטרום זה. דיוק הפגיעה של התנשמת עולה בתלילות ככל שמספר התדירויות הכלולות בקול גדל. מההבדלים בעצמה של טון בודד (קול בעל תדירות בודדת) יכולה התנשמת לקבוע כוון במידת אחד בלבד; ככל שמתרחב הספקטרום מופיעים הבדלי עצמה רבים יותר, המצביעים על זווית המקור ביותר ממישור אחד. נסויים. שבהם נסתמה אוזן אחת של התנשמת, מראים באופן ישיר יותר, שהיא משווה עצמות. תנשמת מאולפת, לה סתמו את אוזנה הימית, נחתה לדריסה משמאל למטה; כאשר סתמו את אוזן שמאל היא נחתה ימינה למטה.

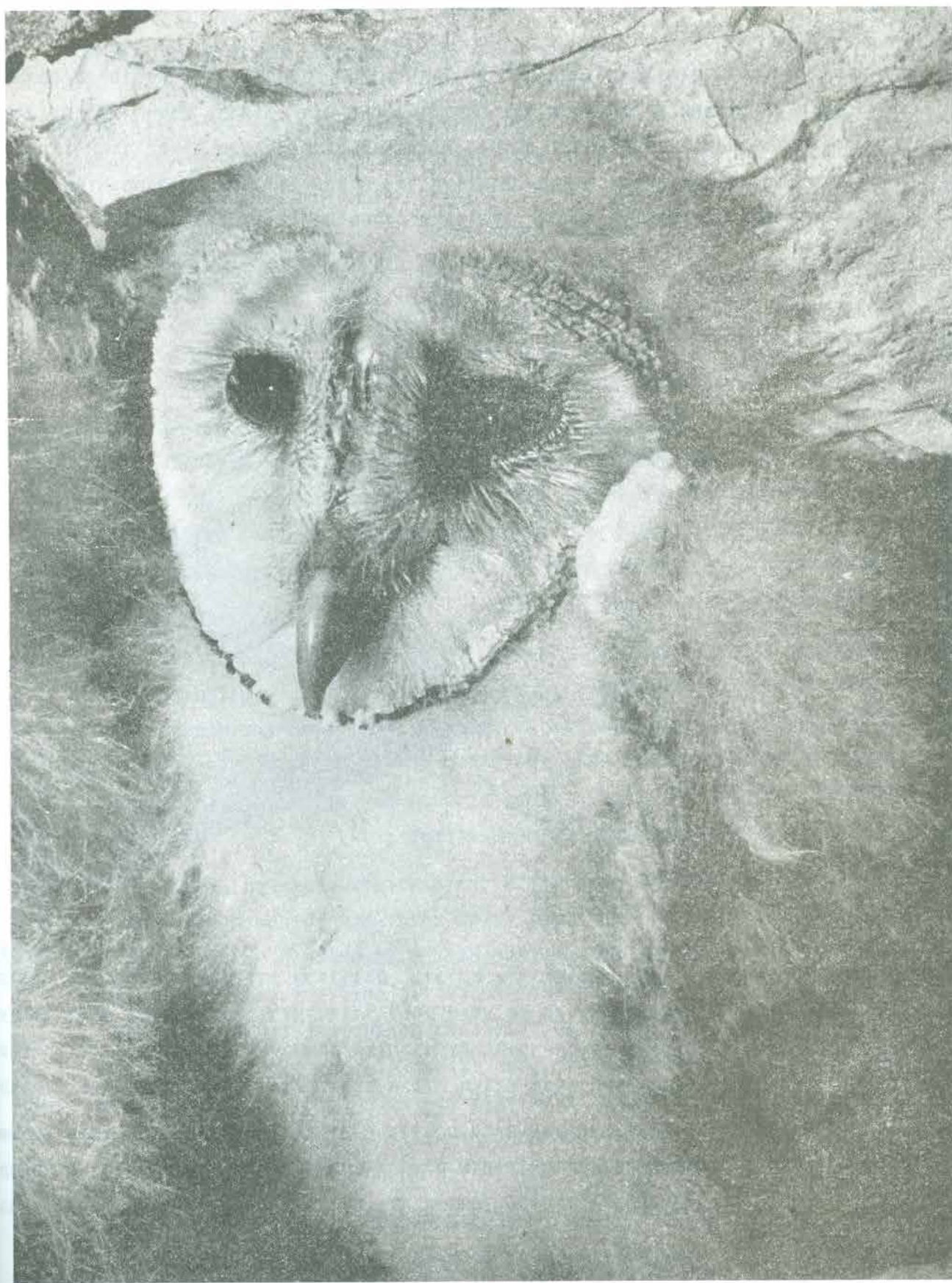
אישור נוסף לכך הושג על ידי הורדת "צוארון הפנים" של התנשמת. כאשר הוא מורד מסוגלת התנשמת לאתר את אזימוט הקול בצורה טובה, אך אינה יכולה לאתר את מקומה האנכי; הציפור מכוונת את עצמה כל הזמן לנקודה אופקית, בלי להתיחס לגובה מהטרה; תופעה זו

מתאימה להיפותזה שלנו: תכונות החזרת הקול של "זר הפנים" מונחים ביסוד הרגישות הכוונית בתדירויות גבוהות, וזה מאפשר לתנשמת לזהות את הזוית האנכית של הקול. הורדת צוארון הפנים מוציאה מכלל פעולה את היכולת להבחין בין גבהים שונים. נשאר עדיין מידה מסוימת של כושר הבדלה בין העוצמות, מכיוון שפתחי האוזניים והקפלים הקדם-אוזניים מסודרים בצורה אסימטרית בקפל העור התומך בנוצות "זר הפנים", אך אין די בכך כדי לאפשר את זיהוי גובה הקול.



ציור מס. 4

קונוס הבלבול נוצר על ידי הכיוונים, ביניהם אין התנשמת מסוגלת להבדיל על בסיס עיכוב בזמן בלבד. עיכוב בזמן יכול לספק מידע על הזוית האופקית של מקור קול. מכיון שכל אוזן נמצאת בדרך כלל במרחק שונה במקצת ממקור הקול, מגיעים גלי הקול אל שתי האוזניים בזמנים שונים במקצת. ככל שגדלה הזוית שבין מקור הקול לבין המישור הקדמי של הציפור, גדל העיכוב בזמן. ישנם כוונים רבים הגורמים לאותו אורך מסלול (קוים מרוסקים) ולכן לאותו עיכוב בזמן; דרושים אותות אחרים כדי שהתנשמת תבדיל ביניהם. במרחב התלת-מימדי יוצרים כיוונים אלו קונוס, שקודקודו נמצא בין שתי האוזניים.



גוזל תנשמת בקינו. צלם: דר' הרמן צינר ז"ל.