

А. В. Мацюра

*Мелитопольский государственный педагогический университет*

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ РАДАРОВ В ОРНИТОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ**

**Приведено огляд радарів, які використовуються для орнітологічних досліджень. У роботі представлені переваги і недоліки основних типів радарів для обліку птахів. На основі світового досвіду підтверджена доцільність використання радарної техніки для дослідження міграцій птахів.**

**In article the review of radars which are used for ornithological researches is resulted. In work advantages and lacks of the basic types of radars for the account of birds are submitted. On the basis of world experience the expediency of use of radar technical equipment for research of migrations of birds is confirmed.**

### **Введение**

В век высоких скоростей и большой концентрации различных летательных аппаратов в атмосфере, проблема безопасности авиapolетов, особенно в местах со сложной орнитологической обстановкой, приобретает особую значимость. Участвовавшие столкновения с птицами нередко приводят к авиакатастрофам и причиняют большой ущерб. Информация о больших скоплениях птиц, получаемая традиционными методами визуального наблюдения и на значительном расстоянии от воздушных трасс, не может обеспечить потребности диспетчерских служб аэропортов. Использование различных радиолокаторов для наблюдения за птицами позволяет решить эту задачу.

Существует довольно большое количество различных типов и конструкций радаров, которые отличаются по своим способностям регистрировать отражения от птиц, определять высоту их полетов, скорости перемещений и т.д.

В настоящей статье мы приводим обзор различных, наиболее современных типов радаров, использование которых может существенно повысить безопасность полетов и снабдить ученых-орнитологов бесценной информацией относительно полетных характеристик птиц.

Использование радаров в орнитологических исследованиях, применительно к условиям Украины – процесс дорогостоящий, требующий подготовленного технического и научного персонала. Тем не менее, современный ученый должен знать обо всех существующих технических средствах и методах исследований.

Один из первых обзоров различных импульсных радаров, применяемых для орнитологических исследований, был проведен в работе [12], сравнительный обзор технических характеристик и возможностей радаров – в статьях [4; 9; 10]. Идеальным для обнаружения птиц является 5-см радар, обнаружение птиц при помощи более длинных волн проблематично, поскольку эти волны подавляют малые цели; на более коротких волнах увеличивается способность к отображению мелких целей, например насекомых.

Для выделения отражений от птиц на фоне других объектов применяются разные технические решения. Круговая поляризация подавляет сигналы от мелких круглых объектов (дождевые капли), индикатор движения цели выделяет объекты с

низкой радиальной скоростью, а точный временной контроль сокращает появление мелких целей при снижении угла обзора.

Веерные радары, такие как авиационные, предоставляют информацию о горизонтальном распределении и направлении миграции [2], отображающую один импульсный объем. При использовании данных радаров нередко происходит переучет высоко летящих птиц, поскольку эти радары точного приближения получают информацию о высотах полетов, но не определяют горизонтальное размещение птиц и направление пролетов. Нередко вертикально и горизонтально сканирующие радары объединяются с целью получить трехмерное изображение.

Современные военные радары избавлены от недостатков веерных за счет существования нескольких лучей, объединенных в один [10]. С их помощью получают три координаты цели. Но если их используют для сканирования большого пространственного объема, то их угловая точность и разрешающая способность весьма ограничены.

Радары с одним лучом получают подобную информацию путем последовательного сканирования. Метеорологи используют такие радары для установления размеров и интенсивности дождевых фронтов. Основным недостатком метеорологических радаров в плане орнитологических исследований – их длительный импульс, приводящий к увеличению объема, особенно на больших расстояниях. Таким образом, много птиц может быть объединено в одно эхо.

Нередко используют и следящие радары [11]. Такие радары получают информацию путем фиксированного вертикально луча, расположенного под определенным углом [4]. Если антенна подвижна, то луч используется для вертикального сканирования перпендикулярно основному направлению миграции [5] или для конического сканирования на различных углах – для получения информации о пространственном распределении птиц в пределах полусферы над радаром [6]. Еще один недостаток данного типа – ограниченность небольшими углами обзоров. Главная проблема, по мнению многих орнитологов, то, что подсчет отраженных сигналов, полученных таким лучом, не может служить объективной информацией о количестве и распределении птиц.

Следящие радары позволяют получать трехмерное положение птицы в пространстве путем конического обзора одним лучом с небольшой его дисперсией вокруг оптической оси антенны или при помощи четырех слабо расходящихся лучей (моноимпульсные радары). Во всех случаях отображается информация о полете птицы в пространстве. Записывая флюктуации сигнала, можно получить информацию о характере взмахов крыльев птицы, когда речь идет об одиночной цели. Использование шара-пилота позволяет дополнить ветровые данные информацией о высоте полета птиц.

В ряде работ [14; 16] признается важность использования метеорологических радаров нового поколения для предотвращения столкновений птиц с самолетами. В США наиболее приемлемым считается радар типа WSR-88D/98D (NEXRAD). Основное направление исследований – использование переменных поляризации для определения птиц и фильтрации прочих сигналов. В перспективе планируется оснастить радар таким образом, чтобы он мог посылать по очереди горизонтальные и вертикальные поляризационные волны. Основные переменные, которые могут быть использованы для определения размеров птиц: фаза дифференциации, обрат-

ное рассеивание дифференциации, коэффициент корреляции между вертикальными и горизонтальными поляризационными данными.

### Возможность определения видов птиц

В работах [12; 15] приводятся сведения по величине эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) для различных видов птиц, полученных путем подвешивания их на нити. В Советском Союзе диаграммы ЭПР птиц были получены в безэховой камере [1]. В этих опытах максимум эхо-сигнала находился между 65 и 115 градусами, что соответствует боковой поверхности птицы. Например, перо и пух голубя, помещенные в пластиковый пакет, имели ЭПР  $5 \times 10^{-5} \text{ м}^2$ . Однако величина ЭПР пакета без перьев не указывается. Опыты с птицей без оперенья давали ту же форму диаграммы ЭПР, что и живые птицы с опереньем. Ниже приводятся результаты классической работы по измерению величины ЭПР для некоторых видов (табл. 1).

Таблица 1

Величины ЭПР разных видов птиц со сложенными крыльями [13]

| Вид                        | Поперечное сечение, см <sup>2</sup> |       |
|----------------------------|-------------------------------------|-------|
|                            | мин.                                | макс. |
| <i>Corvus frugilegus</i>   | 6                                   | 48    |
| <i>Cygnus olor</i>         | 58                                  | 228   |
| <i>Phalacrocorax carbo</i> | 21                                  | 92    |
| <i>Milvus korshun</i>      | 24                                  | 248   |
| <i>Anas platyrhynchos</i>  | 17                                  | 214   |
| <i>Anas platyrhynchos</i>  | 24                                  | 600   |
| <i>Anser anser</i>         | 32                                  | 225   |
| <i>Corvus cornix</i>       | 8                                   | 47    |
| <i>Passer montanus</i>     | 0.3                                 | 8     |
| <i>Sturnus vulgaris</i>    | 1.9                                 | 23    |
| <i>Larus ridibundus</i>    | 7                                   | 52    |
| <i>Ciconia ciconia</i>     | 77                                  | 287   |
| <i>Vanellus vanellus</i>   | 9                                   | 54    |
| <i>Cathartes aura</i>      | 24                                  | 250   |
| <i>Columba livia</i>       | 2                                   | 100   |
| <i>Passer domesticus</i>   | 0.2                                 | 8     |

В табл. 2 и 3 отражены значения радарного поперечного сечения птиц, регистрируемых радаром с различной длиной волны при разных аспектах птицы (ее положение по отношению к лучу радара).

Таблица 2

Значения поперечного сечения птиц, регистрируемых радаром с лучами различной длины [16]

| Вид                                           | Среднее поперечное сечение, см <sup>2</sup> |             |
|-----------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------|
|                                               | 5-см радар                                  | 10-см радар |
| <i>Sturnus vulgaris</i> (боковой аспект)      | 16                                          | 27          |
| <i>Sturnus vulgaris</i> (фронтальный аспект)  | 15                                          | 23          |
| <i>Passer domesticus</i> (боковой аспект)     | 1,9                                         | 15          |
| <i>Passer domesticus</i> (фронтальный аспект) | 1,3                                         | 12          |
| <i>Columbia livia</i> (боковой аспект)        | 15                                          | 80          |

Радарное поперечное сечение птицы позволяет рассчитать некоторые размерные характеристики птицы, а именно: длину и радиус ее туловища, по формуле:

$$\sigma \text{ (радарное поперечное сечение)} = K^2 \pi a^4 / b^2, \quad (1)$$

где  $K$  – длина волны радара;  $a$  – длина туловища птицы;  $b$  – радиус туловища птицы;  $b = 0,72 \sqrt[3]{p}$ ,  $p$  – вес птицы;  $b = 1,97a$ ,  $a$  – длина туловища;  $\sigma_{\text{макс.}} = \pi b^2$ ;  $\sigma_{\text{мин.}} = \pi b^2 / 16$ ;  $\sigma_{\text{ср.}} = 0,11 \pi b^2$ .

Таблица 3

**Вариации радарного поперечного сечения птиц в зависимости от их аспекта (5-см радар) [12]**

| Вид                      | Аспект      | Радарное поперечное сечение, см <sup>2</sup> |
|--------------------------|-------------|----------------------------------------------|
| <i>Sturnus vulgaris</i>  | Фронтальный | 1,8                                          |
|                          | Боковой     | 25                                           |
|                          | Хвостовой   | 1,3                                          |
| <i>Columbia livia</i>    | Фронтальный | 1,1                                          |
|                          | Боковой     | 100                                          |
|                          | Хвостовой   | 1,0                                          |
| <i>Passer domesticus</i> | Фронтальный | 0,25                                         |
|                          | Боковой     | 7,0                                          |
|                          | Хвостовой   | 0,18                                         |
| <i>Corvus frugilegus</i> | Боковой     | 250                                          |

К сожалению, определенную трудность представляют собой мелкие виды птиц, так как при использовании 3-см радара большие насекомые способны давать значения, сходные с таковыми у мелких птиц. Величины радарных поперечных сечений могут отличаться в 10 раз, в зависимости от положения птицы относительно радара или аспекта [4; 12]. Дальнейшие вариации вызываются взмахами крыльев, которые увеличивают значение в 10 раз относительно среднего или снижают почти до нуля на частотах 2–24 Гц во время машущего полета европейских видов птиц, оставаясь на средних значениях при паузах между взмахами.

В исследованиях Bruderer и Liechti [7] все регистрируемые птицы были разделены на группы в соответствии с флюктуацией сигнала, что определялось характером взмахов крыльев. Были выделены следующие классы:

- непрерывные взмахи, от 5 до 9 Гц (в основном крупные кулики и водоплавающие);
- непрерывные взмахи, быстрее 9 Гц (мелкие кулики и водоплавающие);
- прерывистые взмахи, медленнее 12 Гц (крупные воробьиные);
- прерывистые взмахи, быстрее 12 Гц (мелкие воробьиные).

### Обработка записанного сигнала

В качестве примера рассмотрим алгоритм, используемый при обработке сигналов от птиц на доплеровских радарах типа NEXRAD.

При помощи программы обработка выполняется в 5 этапов. На первом – применяется контроль чувствительности, компенсирующий искажения на расстоянии до 3 км от цели. Расстояние выбирается эмпирически, т.к. по имеющимся данным, огромное количество птиц дает эхо, которое хорошо регистрируется. На втором этапе регистрируются сигналы от местников и вычитаются из общей картины. На третьем этапе отражения от подвижных явлений (дождь) вычитаются оператором в

интерактивном режиме. За этим следует автоматическое определение количества и амплитуды всех сигналов в расчетном квадрате. Эти квадраты проверяются сканированием вдоль луча в соответствии с углом подъема антенны. Сигналы ниже определенного уровня отфильтровываются программой. Последний этап содержит определение соседних пиков и подсчет регистрируемых целей [8].

В исследованиях Buurta (Buurta, персон. сообщ.) для обработки сигналов от птиц использовался и используется в настоящее время программный продукт ROBIN, состоящий из системы обработки сигнала непосредственно у радара и принимающей части, расположенной в Гагской штаб-квартире военно-воздушных сил. Система позволяет представить цифровое отображение радарной информации с цветовым распределением отражаемости.

### **Определение числа птиц, скорости и направления полетов, высотного распределения**

Количество сигналов на единицу расстояния делится на усредненную возможность определения птицы на каждом расстоянии (специальная программа) для перехода от исходных данных к определению плотности птиц. Базируясь на предположении, что пропорция птиц с разными размерами одинакова на всех высотах, определяется количество птиц на разных высотах (номинальная ширина луча – 2,2 градуса).

Увеличение ширины луча и уменьшение размеров эха компенсируется специальной программой. Тем не менее, с увеличением угла обзора количество регистраций увеличивается, что объясняется увеличением радиуса обзора при той же угловой скорости. Для компенсации полученные данные умножаются на косинус угла подъема. Также применяется способ, позволяющий учесть аспект регистрируемой птицы (вид с хвоста, с головы). Плотности птиц определяются на отрезках в 200 м (исходя из характеристик пульсирующего объема).

Для подтверждения результатов используется инфракрасная видеокамера с высокой разрешающей способностью. Полученные данные свидетельствуют о том, что операционная ширина луча выше, чем номинальная, особенно на малых расстояниях [7; 8].

Buurta [10], наряду с программой обработки радарных сигналов, применял программу анализа движения, которая соединяет соответствующие эхо от 10 вращений. Согласно направлению, скорости и отражаемости, кластеры соответствующих сигналов анализируются, и в соответствии с алгоритмом программы, объединяются как векторы движения птиц. Итоговое представление информации включает в себя географические координаты, размер эха и среднюю отражаемость, направление, скорость, вариации для всех данных величин и количество всех радио-эхо.

Для анализа векторов направления мигрирующих птиц широко применяется непараметрический дисперсионный анализ и Rayleigh-test [3].

### **Выводы и предложения по улучшению**

Карандашные радары в обзорном режиме могут использоваться для определения направления полетов птиц при условии, что птица, пересекающая обзорное пространство, регистрируется на трех поворотах антенны.

Основная трудность состоит в вариации эха с изменением угла регистрации птицы. Следующая версия эхо-экстрактора должна будет позволить выполнять

анализ движения и разделение птиц по группам в соответствии с углом аспекта. Ночная миграция, которая проходит широким фронтом и часто состоит из мелких одиночных птиц, может быть полностью невидима при головном и хвостовом аспекте. Даже при боковом аспекте определенная часть птиц остается за порогом регистрации. При очень малой высоте полетов птицы регистрируются краем луча, что приводит к получению слабых радиоэхо.

Недостаток, когда птицы регистрируются только при боковом аспекте, может компенсироваться путем измерения угла между потенциальным и реальным направлением полета (в сочетании с поправкой на ветер).

В целом, большинство европейских и американских исследователей склоняется к выводу, что радары обозрения являются лучшим средством регистрации птиц на маршруте миграции.

### Библиографические ссылки

1. Ганя И. Радиолокационная орнитология / И. Зубков, М. Котяцы. – Кишинев: Штиинца, 1991. – С. 123–145.
2. Alfia H. Surveillance radar data on nocturnal bird migration over Israel, 1989–1993 // Israel J. Zoology. – 1995. – 41(3). – P. 517–522.
3. Batschelet E. Circular statistics in biology. – London: Academic Press, 1981.
4. Bruderer B. Methods of quantitative and qualitative analysis of bird migration with a tracking radar / B. Bruderer, P. Steigender // NASA SP-262, Animal orientation and navigation. – 1972. – P. 151–162.
5. Bruderer B. Do migrating birds fly along straight lines? In: Papi F., Wallraff H.G. (eds.) Avian navigation. Springer. Berlin, Heidelberg, New York. – 1982. – P. 3.
6. Bruderer B. Radar studies on nocturnal bird migration in the Negev // Ostrich. – 1994. – 65. – P. 204–212.
7. Bruderer B. Variation in density and height distribution of nocturnal migration in the south of Israel / B. Bruderer, F. Leichti // Israel J. Zoology. – 1995. – 41(3). – P. 477–489.
8. Bruderer B. Short-range high-precision surveillance of nocturnal migration and tracking of single targets Steuri T., Baumgarthner M. // Ibidem. – P. 207–221.
9. Bruderer B. The study of bird migration by radar. Part I–II // Naturwissen-Schaften. – 1997. – 84. – P. 30–45.
10. Buurma L. S. Long-range surveillance radars as indicators of bird numbers aloft // Israel J. Zoology. – 1995. – 41(3). – P. 221–237.
11. Cooper B. A. An improved marine radar system for studies of bird migration Day R. H., Ritchie R. J., Cranor C. L. // J. Field Ornith. – 1991. – 62. – P. 367–377.
12. Eastwood E. Radar Ornithology. – Methuen, London. – 1967. – P. 25–54.
13. Edwards J. Radar echoing area polar. Diagrams of birds / J. Edwards, E. W. Houghton // Nature. – 1959. – 184. – P. 46–92.
14. Gauthreaux S. A. Radar Ornithology – Tracking Migrations by radar // Wildbird. – 1994. – P. 38–39.
15. Konrad T. G. Radar characteristics of birds in flight Hicks J. J., Dobson E. B. // Science, 1968. – Vol. 159. – P. 274–280.
16. Larkin R. P. Flight speeds observed with radar, a correction: slow 'birds' are insects // Behav. Ecol. Sociobiol. – 1991. – Vol. 29. – P. 221–224.

Надійшла до редколегії 25.04.05