

**REVIEW ARTICLE**

Мацюра А.В.

**РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ОРНИТОЛОГИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ:  
КРАТКИЙ ОБЗОР СТАЦИОНАРНЫХ И МОБИЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ***Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия**Email: amatsyura@gmail.com*

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 стран бывшего СНГ – процесс дорогостоящий, требующий подготовленного технического и научного персонала. Тем не менее, современный ученый должен знать обо всех существующих технических средствах и методах исследований.

*Ключевые слова: радар, орнитология, обзор, мобильные комплексы.*

Alex MATSYURA

**ORNITHOLOGICAL RADAR OBSERVATIONS:  
BRIEF REVIEW OF STATIONARY AND MOBILE DEVICES***Altai State University, Barnaul, Russia**Email: amatsyura@gmail.com*

Nowadays, when high speeds and high concentration of different aircraft in the atmosphere could exist, the problem of flight safety, particularly in areas with a complex ornithological situation has special importance. Frequent collisions with the birds often lead to air crashes and inflict great damage. Information about large concentrations of birds received the traditional methods of visual observation and at a considerable distance from the airways, can not meet the needs of airport dispatchers. Using different radars for bird

surveys can solve this problem. There are quite a large number of radars with various types and designs, which differ in their abilities to record the radar reflections from the birds to determine the height of their flights, directions and speeds.

In this paper, we present a short review of different, relatively modern types of radar, the use of which can significantly improve air safety and provide ornithologists with invaluable information regarding the characteristics of the bird flight. Using the radar in ornithological studies in conditions of former CIS countries is rather an expensive process that requires skilled technical and scientific personnel. However, we suppose that the modern scientist should know about all the existing technical means and methods of radar research.

*Keywords: radar, ornithology, review, mobile systems.*

## **ВВЕДЕНИЕ**

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.

Один из первых обзоров различных импульсных радаров, применяемых для орнитологических исследований, был проведен в работе (Eastwood, 1972), сравнительный обзор технических характеристик и возможностей радаров - в статьях (Bruderer, Stegendor, 1981; Bruderer, 1987; Vuurma, 1995). 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, таких как насекомые.

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, отображают информацию о горизонтальном распределении и направлении миграции (Alfia, 1995), 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 (Vuurma, 1995). С их помощью получают три координаты цели. Но если их используют для сканирования большого пространственного объема, то их угловая точность и разрешающая способность весьма ограничена.

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 (Cooper et al., 1991). Такие радары получают информацию путем фиксированного вертикально луча, расположенного под определенным углом (Bruderer, Steigender, 1972). Если антенна подвижна, то луч используется для вертикального сканирования перпендикулярно основному направлению миграции (Bruderer, 1982) или для конического сканирования на различных углах - для получения информации о пространственном распределении птиц в пределах полусферы над радаром (Bruderer, 1984). 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 количества и распределения 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 (Gauthreaux, 1994; Larkin, 1994) 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, обратное рассеивание дифференциации, коэффициент корреляции между вертикальными и горизонтальными поляризационными данными.

### **ВОЗМОЖНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВИДОВ ПТИЦ**

В работах (Eastwood, 1967; Konrad et al., 1968) 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 (Ганя и др., 1991). 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 (Edwards, Houghton, 1959).**

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

**Таблица 2. Значения поперечного сечения птиц, регистрируемых радаром с лучами различной длины (Larkin, 1991).**

Вид	Среднее поперечное сечение, см <sup>2</sup>	
	5-см радар	10-см радар
Sturnus vulgaris (боковой аспект)	16	27
Sturnus vulgaris (фронтальный аспект)	15	23
Passer domesticus (боковой аспект)	1.9	15
Passer domesticus (фронтальный аспект)	1.3	12
Columbia livia (боковой аспект)	15	80

**Таблица 3. Вариации радарного поперечного сечения птиц в зависимости от их аспекта (5-см радар, Eastwood, 1967).**

Вид	Аспект	Радарное поперечное сечение, см <sup>2</sup>
Sturnus vulgaris	Фронтальный	1.8
	Боковой	25
	Хвостовой	1.3
Columbia livia	Фронтальный	1.1
	Боковой	100
	Хвостовой	1.0
Passer domesticus	Фронтальный	0.25
	Боковой	7.0
	Хвостовой	0.18
Corvus frugilegus	Боковой	250

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;

$\sigma_{\text{ макс. }} = \pi b^2$  ;

$\sigma_{\text{ мин. }} = \pi b^2 / 16$  ;

$\sigma_{\text{ ср. }} = 0.11 \pi b^2$ .

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 (Bruderer, Steigender, 1972; Eastwood, 1967). 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 (1995), 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 до расстояния 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 (Bruderer et al., 1995).

В исследованиях Вuurma (Вuurma, 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, НАПРАВЛЕНИЯ ПОЛЕТОВ И 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 эхо 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 200м (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 (Bruderer, Leichti, 1995; Bruderer et al., 1995).

Vuurma (1995), 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 вектора движения птиц. Итоговое представление информации включает в себя географические координаты, размер эхо и среднюю отражаемость, направление, скорость, вариации для всех данных величин и количество всех радиоэхо.

Для анализа векторов направления мигрирующих птиц широко применяется непараметрический дисперсионный анализ и Rayleigh-test (Batschelet, 1985).

### **ОПЫТ СОЗДАНИЯ МОБИЛЬНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ СЕЛЕКЦИИ И ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ОТ ПТИЦ**

С целью создания максимально релевантной системы на базе программы RADR, технические элементы радиолокационной установки должны быть настроенными и откалиброванными для селекции птиц на фоне других целей. Комплексные обзоры радиолокационной техники и ее применения в изучении диких животных были сделаны в работах Eastwood (1967), Williams et al. (1972), Bruderer (1997).

Ряд практических аспектов применения радара (в частности, в изучении миграции птиц) хорошо представлена в работе Gauthreaux (1970). В работе Larkin & Eisenberg (1978) предоставлен отличный обзор использования радиолокационных методов для биологических исследований, а отчет Ruth (2007) содержит много полезных практических перспектив. Мы считаем, что это является необходимым теоретической базой.

Наша цель заключается в обзоре дополнительных деталей для конкретной задачи создания относительно недорогого комплекса с применением небольшого морского радара для использования в орнитологических исследованиях с применением программного обеспечения RADr.

Есть три основных технических ограничения при проведении радиолокационного исследования птиц с помощью небольшого морского радара:

- 1) Выбор радар и антенны;
- 2) Настройка и настройки радара;
- 3) Алгоритм получения, селекции и обработки сигналов от радара.

### **ВЫБОР РАДАРА И АНТЕННЫ**

Исследователи (Eastwood, 1967; Bruderer, 1997; Larkin & Eisenberg, 1978) предоставили комплексные обзоры преимуществ различных типов радаров для биологического исследования. Первый вопрос, который необходимо рассмотреть, какой тип данных необходим пользователю. Основной интерес для большинства пользователей радиолокационных систем является максимальное расстояние, на котором цель должна быть обнаружена, и минимальный размер

(вернее, поперечное сечение) биологической цели (Larkin & Eisenberg, 1978), которые могут быть обнаружены в заданном интервале.

Оценка этих значений требует использования радиолокационного уравнения (Eastwood, 1967; Larkin & Eisenberg, 1978) и зависит от по меньшей мере, трех параметров: коэффициента усиления антенны, выходной мощности радара и длины волны сигнала радара.

При выборе системы радиолокационного наблюдения важно рассмотреть нелинейные отношения между ключевыми переменными: например с удвоением мощности радара не происходит удвоения максимального диапазона, при которой данная цель может быть обнаружена.

Действительно, радарное уравнение предполагает, что мощность радара, который принимает сигнал от данной птицы на фиксированном расстоянии, растет линейно только в отношении мощности передатчика, в то время как она также растет пропорционально квадрату усиления антенны.

Таким образом, выбирая антенну, скажем с 40% более высоким коэффициентом усиления, это будет иметь примерно такое же влияние на дальность обнаружения цели, как удвоение мощности радара.

Кроме того, мы можем повысить максимальную дальность обнаружения данной цели лишь на 19%, за счет обратной связи четвертой степени, исходя из зависимости между мощностью и дистанции регистрации цели.

#### **ТИП И РАЗМЕР АНТЕННЫ**

Способность антенны сосредоточить свое излучение в узком луче называется усилением (Eastwood, 1967; Larkin & Eisenberg, 1978). Усиление пропорционально квадрату размера (ширина, длина или диаметр) антенны. Высокое усиление (и больший размер) антенн способствует выявлению цели на больших расстояниях (Larkin & Eisenberg, 1978). Простейшие радиолокационные антенны производят лучи, которые характеризуются как «главный лепесток» (с основной энергии радара) и нескольких «боковых лепестков» (см. например, Williams et al. (1972). Основной особенностью антенны является ширина луча и форма, где ширина луча определяется как угловой промежуток между точками половинной мощности главного лепестка (Bruderer, 1997).

Важно отметить, что в зависимости от диапазона и отражательной способности, некоторые цели будут выявлены за пределами этих половинных точек, и, возможно, в пределах боковых лепестков радара, давая любой конкретной антенне более широкую эмпирическую ширину луча. Эти эффекты не могут быть учтены с большой точностью (Ruth, 2007).

Два основных типа антенн, которые могут быть использованы с морскими радарными для биологических исследований, являются параболические антенны и открытые "г-образные".

Параболические антенны производят конические лучи: в зависимости от фокусного расстояния, для волн длиной 2.5-3.75 см (X диапазон) антенна с внешним диаметром ~ 0,5 м, как правило, производит луч шириной ~ 4 °. Угловой диаметр пучка уменьшается с увеличением диаметра антенны для

данного фокусного расстояния. Когда луч с помощью параболической антенны наводится на цель под углом над горизонтом и вращается на  $360^\circ$  (т.н. режим сканирования), пользователь может определить географическое положение цели ( $X$ ,  $Y$  координаты) и высоту ( $r$ ) цели, используя простые уравнения тригонометрии.

При небольших углах, относительная погрешность  $x$  и  $y$  низкая, однако относительная погрешность  $r$  - высока; при более высоких углах, состояние меняется на обратное.

В противоположность этому, открытая антенна формирует веерный пучок, который является узким по горизонтальной оси ( $\sim 1-2^\circ$ ) и широким по вертикальной оси ( $\sim 20^\circ$ ). Горизонтальная узость пучка в значительной степени зависит от длины антенны, то есть более длинные антенны производят более узкие лучи. Открытая антенна предоставляет позиционную информацию о целях, но в связи с тем, что цель может быть где угодно в рамках более широкого диапазона ( $\sim 20^\circ$ ), она не обеспечивает прямую информацию о высоте ( $r$ ) при использовании в нормальном горизонтальном положении.

### **ВЫХОДНАЯ МОЩНОСТЬ**

Максимум выходной мощности морского радара, что измеряется в киловаттах, влияет на максимальную дальность обнаружения цели. Более мощные радары часто имеют большие двигатели, а это значит, что более крупные антенны могут быть использованы для улучшения регистрации птиц.

На практике, в большом диапазоне радиолокационных измерений, это означает, что дальность обнаружения цели антенна, чем от пиков выходной мощности. Однако зоологи и орнитологи склонны использовать меньшие портативные радары с мощностью от 3 кВт (Williams et al., 1972; Peckford & Taylor, 2008; Harmata et al., 2003) до 50 кВт (Gauthreaux, 1970). Наиболее часто используется диапазон 10 кВт (Peckford & Taylor, 2008; Harmata et al., 2003; Tulp et al., 1999; Petersen et al., 2006) и 25 кВт (Desholm, 2003; Kahlert et al., 2003; Hupop et al., 2006). В пределах этого диапазона, мы считаем, что удвоение пика выходной мощности только увеличивает дальность обнаружения цели примерно на 19%.

### **ДЛИНА ВОЛНЫ**

Bruderer (1997) утверждает, что выявленные мелких птиц достигает максимума на длинах волн 3,8-15 см, которые образуют C диапазон (3,8-7,5 см) и нижнюю часть S диапазона (7,5-15 см).

Однако, даже небольшие длины волн X радаров (2,5-3,75 см) лучше обнаруживают маленькие цели, такие как насекомые (Bruderer, 1997). Сигналы от длинных волн, с другой стороны, менее зависят от воздействия осадков (Richardson, 1978) и могут считаться лучшими для наблюдения биологических целей (птицы) в условиях дождя или снега (Larkin, Eisenberg, 1978).

По нашему мнению, важным моментом является то, что вероятность обнаружения мелких целей, представляющих интерес для орнитологов, гораздо ниже при использовании более длинных волн (S диапазона), а это требует в полевых условиях значительных дальнейших исследований.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕЛИ И ТИП АНТЕННЫ

Мы проанализировали преимущества и недостатки открытых и параболических антенн с точки зрения ширины и формы радарных лучей. Для обеих антенн точность позиционной информации возрастает по мере сужения ширины луча. По нашим расчетам, с точки зрения мощности двигателя и ветровой нагрузки, максимальный размер параболических антенн должен составлять около 0,75 м, а максимальная длина антенны должна составлять около 2,5 м.

Эти антенны, как правило, имеют меньшие горизонтальные ширины луча, поэтому они обеспечивают лучшее распределение по азимуту.

Поскольку луч является относительно широким в «вертикальном» режиме, открытые антенны не могут решить задачу определения целей, которые находятся в одном азимуте и дальности, но на разных высотах.

Целевая дискриминация также является функцией длительности импульса, способностью цифровой платы и угла над горизонтом относительно антенны.

По нашему мнению, необходимо учитывать все эти факторы при интерпретации данных, полученных с радиолокационной установки.

Наконец, открытые антенны способны сканировать больший объем при большей вертикальной ширине луча. Дисконные антенны более пригодны для сканирования определенных высот или областей, представляющих интерес, и способны обеспечить более точные оценки высоты целей.

Заявленные ширины луча от производителей антенн очень приблизительны, и по разным причинам не позволяют точно воспроизводить объемы пространства выборки. Есть по крайней мере три важных момента.

Во-первых, паспортная ширина является углом расстояния между «половиной мощности» - точек по обе стороны от луча, где отраженные радиосигналы составляют половину пиковой мощности (Richardson, 1978).

Таким образом, на данном расстоянии цели с большими радиолокационными сечениями (отражающие больше энергии) будут производить более крупные ширины луча.

Эти отношения еще более осложняются тем, что радарное поперечное сечение не меняется, как простая линейная зависимость от размера объекта (см. Larkin & Eisenberg, 1978).

Во-вторых, сила возвращения радиосигнала уменьшается из-за зависимости четвертой степени расстояния до цели, так как эффективная ширина пучка уменьшается с увеличением диапазона, поэтому обнаружение цели требует более сильного радиосигнала, чем фон или местный шум.

В-третьих, поскольку сила обратного радиосигнала зависит от атмосферных условий (Richardson, 1978), эти условия также будут влиять на ширину луча.

В совокупности эти соображения означают, что ожидаемые отношения между вероятностью обнаружения цели заданного размера с расстоянием не линейны и должны быть откалиброваны для любой территории и радара.

Кроме того, метод, с помощью которого цели могут быть определены и отделены от фона (например, с помощью особой настройки программного

обеспечения или метода, который используется для обнаружения целей), дополнительно повлияет на эти показатели определения целей.

В работе Tulp et al. (1999) представлены некоторые детали для калибровки РЛС для радара, а в статье Petersen et al. (2007) представлены детали реализации калибровки для большого радара слежения. Более подробную информацию можно найти в различных радиолокационных справочниках (например, Ruth, 2007; Peckford & Taylor, 2008; Harmata et al., 1999).

### **РАСЧЕТ ПОЛОЖЕНИЯ В ЦЕЛИ ПРОСТРАНСТВЕ (X, Y, R)**

Высота луча радара влияет на точность оценок высоты (Z) - более толстые пучки имеют меньшую точность.

Для параболической антенны это также зависит от горизонтального угла оси антенны - ошибка определения высоты уменьшается по мере увеличения угла пучка, и является минимальной, когда луч находится в вертикальном положении. Например, конусный пучок шириной луча  $4^\circ$  под углом  $45^\circ$ , будет производить оценку высоты  $r$ , которая на  $\sim 25$  м выше или ниже истинной  $r$ , когда цель находится на расстоянии 1000 м в диапазоне от нижнего или верхнего края луча соответственно.

Для получения информации по высоте с минимальной ошибкой, некоторые пользователи используют открытую антенну, наклоненную под углом, или расположенную на стороне автомобиля или трейлера (Harmata et al., 1999).

Таким образом, обнаруженный объект в пучке  $\sim 20^\circ$ , направленном точно вниз, будет в реальности находиться около  $10^\circ$  от вертикали и будет зарегистрирован с примерной максимальной ошибкой  $\sim 15$  м. Следует отметить, что в этих примерах, ошибкой в таких диапазонах пренебрегают (с точки зрения размера птиц).

На практике, разрешенный диапазон, ограниченный частотой дискретизации и способностью программного обеспечения к оцифровке (например,  $+ / - 5$  м при 15 МГц), является дополнительным источником ошибок.

Информация по высоте может быть также получена с помощью открытой антенны для ряда целей или треков и предположения о постоянной высоте диапазона (Cohen & Williams, 1980), но неопределенность, связанная с этой оценкой пока не известна.

Если антенна наклонена под достаточно большим углом (например, если она формирует конус), то факт, что верхняя (внутренняя) часть пучка формирует конус меньшего диаметра, чем в нижней части пучка, может быть использован для определения позиции в пучке (с разным и малоизученным уровнем ошибок), которые могут быть использованы для получения приблизительного значения координаты z.

Высотную и пространственную информацию иногда получают путем приведения в действие вертикального сканирования радара одновременно с горизонтальным радарным сканированием (Krijgsveld et al., 2005) или изменением между двумя позициями с одной антенной.

В настоящее время принято считать, что пользователь не может легко получить одновременную информацию относительно единственной цели таким образом. Гораздо более сложными методами получения информации о целях и треках является объединение информации из нескольких радаров; подробности можно найти в различных радиолокационных исследованиях (Williams et al., 1972; Gauthreaux, 1970; Ruth, 2007; Richardson, 1978).

### **УСТАНОВКА РАДАРА И КОНФИГУРАЦИЯ**

Как специализированная часть оборудования, радар должен быть установлен и настроен для оптимального сбора данных.

**Радарные настройки.** Все новые радары должны быть настроены, оптимизированы и откалиброваны. РЛС работает, посылая импульс, и измеряя все возвращенные сигналы (или "радиоэха") от объектов в пучке в течение установленного интервала времени, соответствующего фиксированной максимальной дальности. Правильная настройка является фундаментальной частью максимизации силы радиоэха.

Морские X радары излучают электромагнитные импульсы фиксированной длины волны примерно 3,2 см.

Импульсы излучаются в пределах номинальной мощности радара в течение короткого периода (от 50 до 1200 наносекунд), после чего передатчик отключается, и приемник ожидает отражения на той же длине волны в течение некоторого заданного временного периода. Частота, с которой эта передача / прием повторяется (частота повторения импульсов или PRF) составляет от 600 до 3000 Гц в зависимости от модели радиолокатора и текущего максимального значения диапазона.

Чтобы расшифровать информацию, содержащуюся в этом отраженном импульсе, импульс сначала должен быть усилен. Усиление сигнала на такой высокой частоте с целью получения стабильных результатов по разумной цене, является технически сложной задачей.

Морской радар обычно используется как относительно недорогое решение на основе супергетеродинного алгоритма (Richardson, 1978).

Например, радары Furuno имеют начальную "оптимизацию" установки, которая устанавливается характеристиками системы слежения IF. Резервная "ручная" функция настройки также доступна, чтобы обеспечить оператору возможность проверки правильности работы системы приемника.

Различные производители радара используют свои методики для настройки, оптимизации и калибровки, но крайне важно, чтобы все процедуры, которые делаются при первом использовании РЛС и периодически во время ее использования, обеспечивали оптимальную производительность.

**Настройка радара: амплитудно-частотная характеристика, отражения от дождя и морских волн.** На большинстве коммерческих радаров пользователи могут настроить изображение, которое представлено на экране дисплея (обычно его называют индикатором кругового обзора, или PPI) на различные настройки сигналов и фильтров.

Пользователи могут настроить тип выходного сигнала путем внесения изменений в продолжительность импульса. Длительность импульса является количеством времени между первым и последним моментом одного переданного радиолокационного импульса. Небольшие морские радары, как правило, имеют три режима настройки длительности импульса (краткосрочные, среднесрочные и долгосрочные); по отношению к продолжительности импульса выбирается режим на основе максимальной дальности, с которой пользователь хочет получить информацию.

Длинные импульсы необходимые для обнаружения целей в более отдаленных диапазонах, но более короткие длительности импульсов обеспечивают лучшую разрешающую способность, так как их энергия "распространяется" в течение более короткого времени и расстояния (см. Eastwood, 1967; Larkin & Eisenberg, 1978). Диапазон ограничен выбором частотой повторения импульсов (ЧПИ). Выбор «идеального» диапазона является вопросом выбора релевантной ЧПИ и длительности импульса и зависит от ожидаемого радарного поперечного сечения цели на определенном расстоянии. Например, Harmata et al. (2003) считают, что проведение исследований, используя короткие ТИ в диапазоне ~ 1,4 км с помощью 10 кВт X-Band радара позволяет определять воробьиных птиц. По нашему мнению, требуются дальнейшие исследования, чтобы определить, какие именно длины импульса лучше всего подходят для орнитологических исследований. Схема действия главного луча (Main Lobe) и вторичных лучей (Side Lobe) для т-образной антенны (Furuno) представлена на рис. 1 (Petersen et al., 2006; Kahlert et al., 2004).

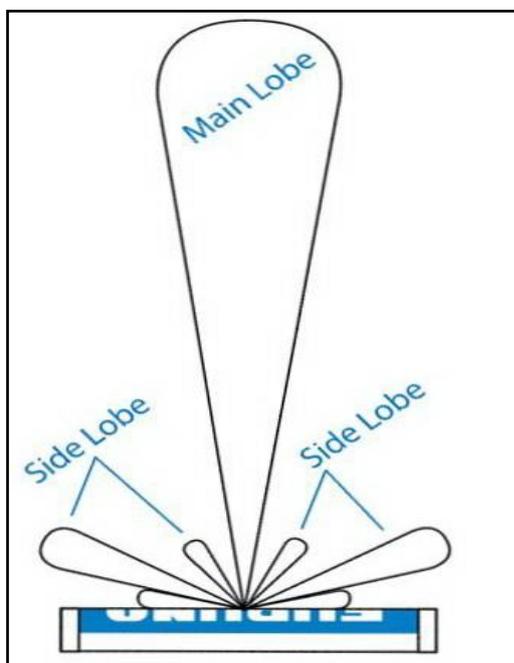


Рис. 1. Схема действия главного луча (Main Lobe) и вторичных лучей (Side Lobe) для т-образной антенны (Furuno)

Пользовательские преобразования отраженных сигналов для типовых морских радаров включают усиление, системы «антидождь» и «антиморе». Эти настройки применяются для радиолокационного сигнала, возвращенного от антенны, так что пользователь может улучшить способность обнаруживать цели, когда они работают с радарным PPI.

Усиление регулирует чувствительность экрана к отраженному сигналу. Высокий коэффициент усиления покажет все отраженные сигналы (в том числе значительное количество шума), в то время как низкий коэффициент усиления будет удалять информацию обо всех, кроме самых крупных, целей.

Система антиморе снижает мощность обратного отражения от местных объектов. Система антидождь снижает возвращения от больших целей. Кроме того, некоторые радары оборудованы системой регулировки чувствительности относительно времени - STC, которая "сглаживает" интенсивность луча на коротких расстояниях (см. например, Schmaljohann et.al., 2008).

Для биологических исследований, которые должны включать пост-обработку радиолокационного сигнала, усиление должно быть очень высокой (как можно выше, увеличивая информацию, возвращенную от целей, но в конечном счете это будет функция конкретного радара в отношении фабричных настроек усиления). Все системы типа анти-дождь должны быть выключены (Hirorp et al., 2006).

Для увеличения эффективности радарных наблюдений нужно максимизировать количество информации между минимальным и максимальным уровнями мощности, продуцируемым радаром и оцифровать это в линейном масштабе.

Режим снижения помех подавляет помехи, вызванные работой радаров на той же частоте. Поскольку эта функция обнаруживает и отфильтровывает небольшие сигналы (возможно, в некотором роде неизвестные пользователю), она может также отфильтровать небольшие биологические цели, и вероятно, ее не следует использовать.

Тем не менее, некоторые исследователи использовали этот режим при одновременном запуске двух радаров в непосредственной близости (Desholm, 2003).

Таким образом, пользователь должен выполнить оцифровку радиолокационного сигнала, полученного после выключения режима ослабления помех и любых дальнейших усилений сигнала, то есть не надо применять режимы фильтрации "черного ящика" от производителя.

Если это невозможно, пользователь должен получить подробную документацию о влиянии какой-либо обработки, которая происходит относительно полученного радарного сигнала.

Квалифицированный радарный техник может проверить электрическую схему радара и определить наилучшее место для отбора сигнала, который будет подаваться на карту для оцифровки.

Проект RADR направлен на содействие обмену такой информацией для радарных пользователей. В качестве эмпирической проверки оцифровки

пользователь может изменить настройки радара, чтобы максимально увеличить целевую чувствительность, а затем сравнить информацию с экрана (PPI) радара с тем, что производится RADR программным обеспечением от сырого оцифрованного сигнала радара.

Все особенности целей, представленные на экране радара, должны быть предоставлены в графическом окне программы RADR (возможно после регулировки параметров RADR). Задача программы состоит в том, чтобы в рабочем окне программы RADR отображать дополнительную информацию, которая недоступна на мониторе радара (PPI).

**Снижение сигналов от рельефа и боковых лепестков.** Сигналы, возникающие от подстилающей поверхности и возвращаемые от объектов, расположенных на земле возле радара, должны быть нивелированы. Боковые лепестки - это место за пределами основного луча радара, где передаваемая мощность значительно ниже, относительно главного луча. Боковой эффект излучения - это любая энергия, выходящая от края антенны (Larkin & Eisenberg, 1978).

Радиоизлучение может отражаться от окружающих объектов или растительности и привести к избыточной энергии на близких расстояниях (Larkin & Eisenberg, 1978) или маскировки основных целей. Есть определенная документация по сокращению этого шума (Eastwood, 1967; Williams et al., 1972; Bruderer, 1997; Gauthreaux, 1970; Larkin & Eisenberg, 1978). Снижение помех, как правило, имеет решающее значение для получения полезных данных радиолокационных наблюдений на коротких дистанциях, но оно очень сильно зависит от типа радара и места радарных наблюдений.

Сигналы от рельефа могут быть уменьшены различными средствами.

Как правило, менее проблематично, если угол антенны радара находится выше земли, так как доля пучка пересекаемая местные структуры, уменьшается (Eastwood, 1967; Bruderer, 1997). Аналогично, повышение радара относительно поверхности земли с помощью башни или транспортного средства, (Ruth, 2007; Peckford & Taylor, 2008; Harmata et al., 2003) может также уменьшить шум.

В качестве альтернативы (или в дополнение), часть боковых лепестков или избыток энергии может быть заблокирован при расположении радара в небольшом понижении (Eastwood, 1967) или среди растительности (Bruderer, 1997). Некоторые исследователи строили радиолокационные заборы путем присоединения металлических конструкций к нижней стороне открытой антенны, присоединением защитного забора к параболической антенне (Larkin & Eisenberg, 1978) или построением кругового барьера вокруг антенны с помощью радиолокационного поглощающего материала (Richardson, 1978). Алюминиевая сетка может частично поглощать радиолокационную энергию при условии, что размер окна не больше, чем половина длины волны (то есть 1,6 см для морских радаров X-диапазона). Следует отметить, что все физические снижения помех могут изменять эмпирическую форму луча в некоторой степени, что имеет определенное значение для интерпретации радиосигналов.

**Расположение радара.** Радар должен быть размещен в месте, где антенна может сканировать полный объем пространства, для которого пользователь заинтересован в получении информации. Поскольку радарная энергия хорошо отражается от воды и металла, пользователи должны расположить радары подальше от металлических зданий и избежать направления луча на слишком низкий угол рядом с открытой водой (особенно в условиях морских волн).

Некоторые варианты расположения радарного комплекса представлены на рис. 2.



Рис. 2. Варианты монтажа мобильного радарного комплекса, внешний вид монитора и рабочее место оператора

### **Вертикальный режим работы радара.**

Принципиально новым шагом в радиолокации с использованием морского радара будет его применение в вертикальном режиме, то есть перпендикулярно поверхности земли. Это даст возможность получить данные о высотном распределении птиц в пространстве и позволит построить зоны и коридоры с минимальной и максимальной концентрацией птиц в пространстве.

Мобильность создаваемого радарного комплекса позволит располагать радар в направлении, перпендикулярном к ожидаемому направлению полета

перелетных птиц. Это максимизирует шансы на записи каждой группы птиц как одного трека.

Кроме того, вычисления потоков птиц в определенном месте опирается на основное предположение, что радиолокационные сканирования проводятся перпендикулярно среднему направлению полета. Если это предположение не выполняется, площадь сканируемого воздуха ( $A$ ) должна быть скорректирована с учетом разницы между ориентацией радиолокационного импульса (RDIR) и среднего направления полета (FDIR). Исходя из формулы, описанной van Gasteren et al. (2002), эта коррекция может быть выполнена следующим образом:

$$A_c = A * \sin(RDIR - FDIR),$$

где  $A_c$  представляет собой скорректированную площадь сканируемого пространства.

В дальнейшем, измеряемый электромагнитный импульс нуждается в корректировке на  $1 / A_c$ , чтобы приблизиться к более точным значениям. Без этой поправки вычисления могут привести к недооценке. Исходя из формулы, поправочные коэффициенты должны применяться, когда среднее направление полета параллельно радиолокационному лучу, но они должны быстро снижаться при направлении полета, расположенного более диагонально по отношению к радиолокационному импульсу. Например, когда среднее направление полета  $45^\circ$  относительно радиолокационной диаграммы, импульс должен быть исправлен с коэффициентом 1,41.

Другими словами, если среднее направление полета отклоняется на 50% от ориентации радарного луча, то будет происходить недооценка в 41% без коррекции для направления полета.

С другой стороны, если перпендикуляр направления полета отклоняется на 25% (то есть радар ориентирован в сторону на 67,5% по отношению к среднему направлению полета), то необходимо выполнить коррекцию на 8,2%. Если отклонение меньше  $8^\circ$  (8,9%), недооценка будет меньше 1%.

Однако, все эти расчеты поправочных коэффициентов на основе расчетов Gasteren et al. (2002) предполагают, что поток, измеренный через вертикальную поверхность, выше гипотетической линии шириной 0 м.

Поскольку вертикальный радар имеет конкретную ширину луча и, следовательно, записи импульсного потока в объеме, а не вдоль линии, то недооценка крайней мере меньше, а во многих случаях близка к измеренному потоку ( $A$ ), так как треки, записанные с помощью трехмерного луча проецируются на двухмерном экране радара.

Это означает, что некоторые треки, которые не пересекают воображаемую линию с шириной 0 м, все равно записываются. Принцип, как это работает, приведен на рисунке. Хотя эффективная ширина диаграммы не является постоянной для всех видов и на всех высотах, степень влияния недооценки ограничивается только мелкими видами птиц.

Хотя в работе Krijgsveld et al. (2005) теоретические эффективные ширины луча были детально рассчитаны, степень этого влияния не может быть измерена

количественно, поскольку радар не может отличить виды птиц (или группы видов).

Сравнения потоков птиц в разных местах возможно, если направления их полетов похожи. Для того, чтобы пост-контроль перпендикулярности позиции радара отвечал главному маршруту полета и, чтобы проверить, насколько отличаются направления полетов в различных местах работы радара, необходимо выполнить сравнение длины записанных треков.

В случае, когда достаточно много птиц пролетает параллельно лучу радара, мы ожидаем получить довольно длинные треки. Чем больше среднее направление полета приближается к  $90^\circ$  по отношению к лучу радара, тем более короткие длины треков мы ожидаем (рис. 3 и 4).

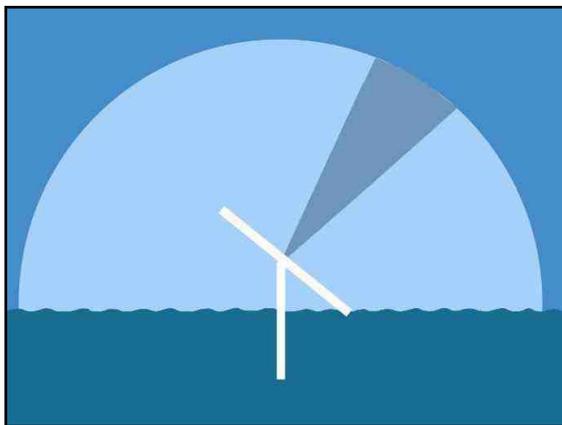


Рис. 3. Схематический рисунок вертикального режима работы радара.

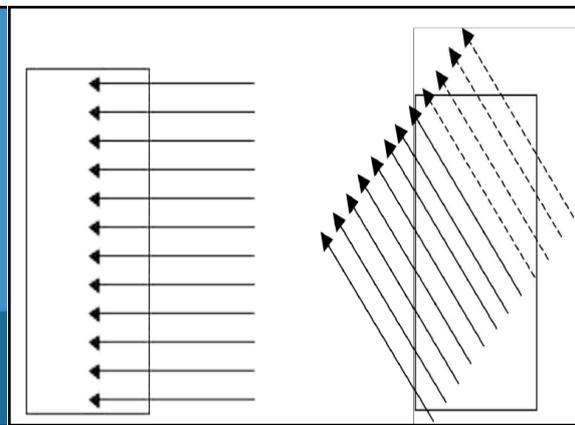


Рис. 4. Схема пролета птиц под разными углами относительно диаграммы антенны в режиме вертикального сканирования

Как правило, средние длины треков должны быть примерно 34 пикселя с максимально возможными 1024 точками, что определяется шириной экрана радара (т.е. 3,3% и 3,1% от возможной длины). Статистическое сравнение медианы треков может быть проведено с помощью парного критерия Стьюдента.

На рис. 2.4 слева – полет под углом в  $90^\circ$ , а справа - диагональный полет птиц, ориентированный под углом  $0^\circ$ . Дистанция между стрелками одинакова; считается, что все характеристики пролета одинаковые, кроме направлений. На рисунке справа прерывистые стрелки означают недооцененных птиц при диагональном пролете, ширина луча принимается как 0 метров. В случае более широкого луча (дорисованный прямоугольник) все треки регистрируются радаром, и им практически не нужна коррекция. Однако, следует иметь в виду, что ширина прямоугольника зависит от типа радара и вида птиц. Один из вариантов режима работы радара в разных плоскостях представлен на рис. 5.



Рис. 5. Режим работы радара в вертикальной (слева) и горизонтальной плоскости (из Harmata et al., 2003).

### **ПОЛУЧЕНИЕ СИГНАЛА ОТ РАДАРА**

Определенные методы сбора радиолокационных данных были использованы в прошлом, в том числе использование фотографирования экрана (Richardson, 1978; Harmata et al., 2003; Мацюра, 2005) и захвата при помощи программного обеспечения информации от экрана с последующим превращением его в видео. Однако, чтобы получить максимальное количество информации с радиолокационного сигнала, необходимо использовать специализированный аналого-цифровой преобразователь, соединенный с компьютером. Такие преобразователи уже были изготовлены исследователями (например VSU), также доступны коммерческие продукты, существующие под названием радарные цифровые платы.

Они работают, используя четыре типа аналоговых сигналов от радара:

(1) "видео", которое является аналоговым сигналом, напряжение представляет собой мощность сигнала радиоэха назад к радару от целей.

(2) триггер или пусковой импульс, который точно указывает момент времени, когда каждый радарный импульс отражается радаром, чтобы обеспечить точку отсчета для синхронизации отражения от целей.

(3) направление (или импульс установки азимута (ARP), который отмечается каждый раз, когда радар завершил поворот на 360 градусов и начинает цикл снова.

(4) курс (или импульс изменений азимута (АКТ), который отмечается относительно фиксированной угловой скорости при вращении антенны и позволяют выполнить коррекцию изменений антенной скорости при оборотах антенны относительно изменений напряжения и силы ветра.

Захват и обработка выходного сигнала позволяет пользователю получить гораздо больше информации о биологических целях, чем обычно отображается на стандартном радиолокационном экране PPI.

Типичный дисплей коммерческого радара в состоянии предоставить только семь уровней интенсивности радиоэха, в то время как коммерческие модели радарных цифровых карт могут предоставить больше, чем 4096 уровней интенсивности (12 бит) с того же сигнала (рис. 6). Мы сделали анализ радиолокационных цифровых плат, доступных от нескольких производителей, среди которых Сигма S6 карты от Rutter Technologies, (Сент-Джонс, Ньюфаундленд, Канада), XIR3000 производства Russel Technologies, (North Vancouver, Британская Колумбия, Канада).



Рис. 6. Типичный дисплей радара Furuno

Для наших орнитологических задач, учитывая интеграцию с Фуруно и Radr программой, мы считаем, что наиболее адекватной является использование платы USPR-1Ettus Research, USA.

Использование такой платы не требует специального программного обеспечения в сочетании с устройством захвата сырого видеосигнала от экрана радара и предоставит уникальные возможности для обработки и интерпретации сигналов от птиц.

**Настройка платы.** Главная задача, которую нужно решить для получения биологической информации, это минимизировать (и по возможности устранить) любую обработку радиосигналов с помощью платы и увеличить количество импульсов, соответствующих одному обороту антенны с учетом аппаратных и программных ограничений.

### ОБРАБОТКА РАДАРНЫХ ДАННЫХ

Обработка орнитологической информации должна выполняться в два этапа. На первом этапе информация от радара цифруется и обрабатывается с целью снижения влияния объектов рельефа, выделения цели и построения треков движения.

На втором этапе информация, которая уже может быть обработана с помощью компьютера, интегрируется в виде векторов движения с картографической информацией на его экране. Эта процедура может быть сделана с помощью программы RADr и ее компонентов TVW (Track Viewer Workstation, опция просмотра треков) и TDV (Track Data Viewer, просмотр данных трека).

**Координаты целей.** Треки и другая информация хранится в архиве. Архивные данные затем могут быть обработаны с помощью статистических пакетов, ГИС и других методов анализа. Общая схема обработки информации представлена на рис. 7.

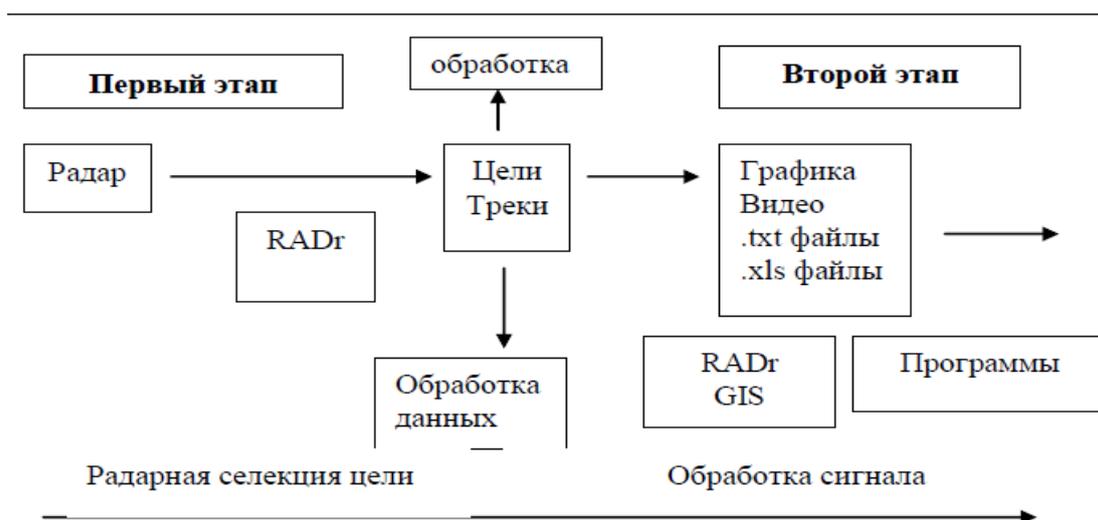


Рис. 7. Схема обработки радарных данных

### ОПЕРАТИВНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАДАРНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Хотя орнитологические радиолокационные системы поддерживают пост-обработку сигналов, обеспечивая возможности для хранения и управления

данными, базовая конструкция радара поддерживает и оперативное использование данных, при работе квалифицированных операторов. Монитор радара обеспечивает неизменный вид радиолокационных данных, включающих цели и помехи. Большинство радиолокационных систем способны сохранить историю изображений, которая может быть использована в качестве простого инструмента отслеживания целей.

Безусловно, необходим определенный опыт для интерпретации данных с радарных дисплеев, так как дисплей имеет радиальный контекст, и круговая ориентация экрана может представлять определенные трудности для наблюдателя. Экран является важным компонентом системы, потому что его информация первичная, свободная от обработки и устанавливает основу для интерпретации любых обрабатываемых данных.

На мониторе компьютера отражаются уже обработанные данные, как правило, с картой или другой географической привязкой дисплея. Обработанные данные непрерывно обновляются, и процессор может показать координаты целей и треки - перемещение целей со временем. Этот дисплей предоставляет оператору информацию, которую можно использовать непосредственно для оперативных орнитологических целей.

Общие параметры оперативного использования информации приведены на рис. 8.

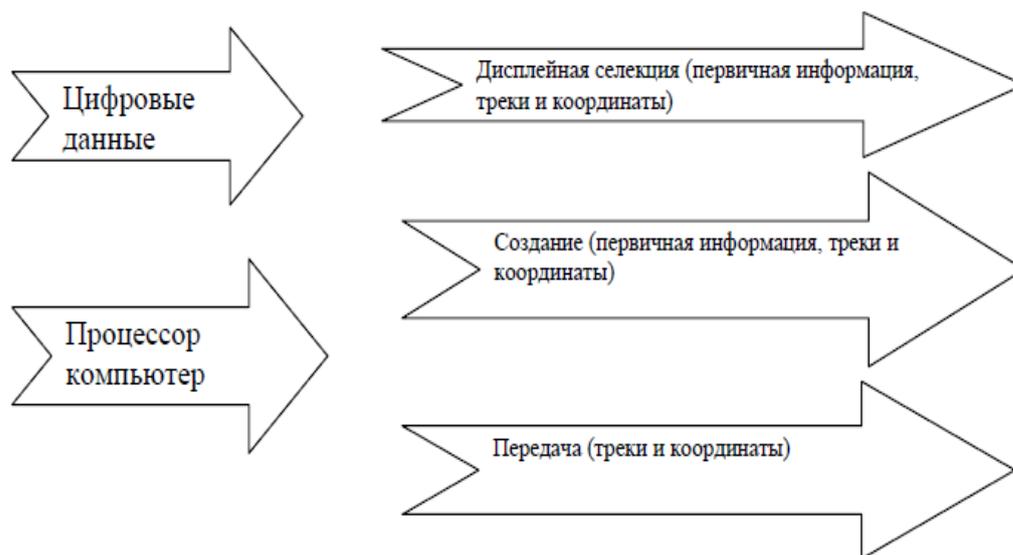


Рис. 8. Режим оперативного использования радарной информации

Цифровые данные обрабатываются с помощью компьютера. В зависимости от системы производителя, можно улучшить характеристики изображения путем регулирования таких параметров как цвет, история и длина трека.

Кроме того, в некоторых системах возможно оперативно воспроизвести только наблюдаемые условия. После обзора данные записываются и передаются в архив для последующего просмотра или пост-обработки.

### ПРОМЕЖУТОЧНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАДАРНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Промежуточное использование радиолокационных данных представляет записанные координаты целей в виде треков и данные о производительности радара, включает почасовые, суточные или другие базы данных. Промежуточное использование данных зависит от характеристик системы и определяет свойства хранимых данных и инструменты пост-обработки, доступные для анализа этих данных. Некоторые поставщики предоставляют специализированное программное обеспечение для просмотра треков и их анализа. Например, основанные на времени истории треков, которые обеспечивают изображение динамики движения птиц.

Определение участков и подсчет треков в них является основой для разработки системы оповещения о потенциальной опасности от птиц.

Промежуточный этап использует изображения, видео и файлы для генерации текста или анализа электронных таблиц, что показано на рис. 9.

Файлы данных, что, как минимум содержат данные о времени, трековой скорости, направлении и координатах цели (широта и долгота) могут быть доступны для дальнейшего анализа с использованием программ для отображения данных или геоинформационных систем.

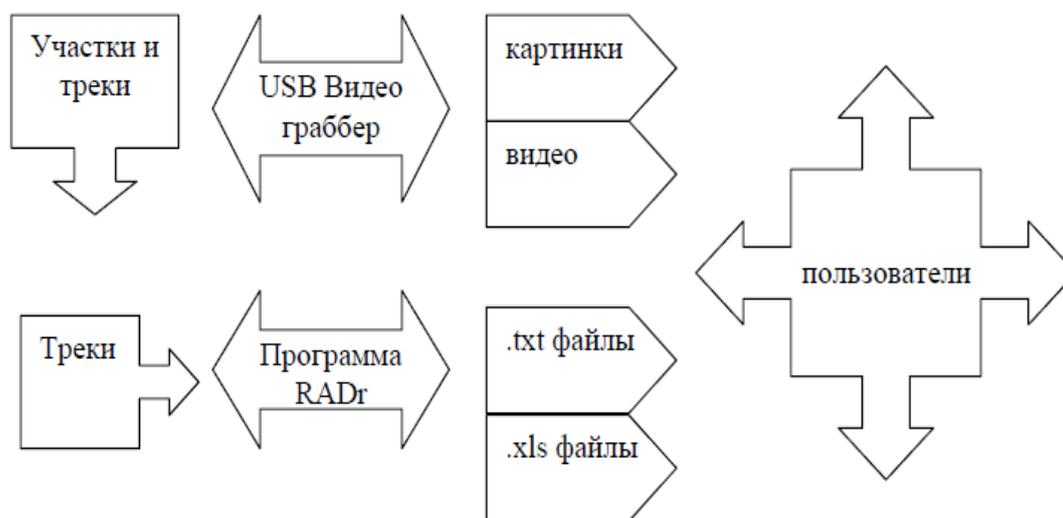


Рис. 9. Схема воспроизведения обработанных данных.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Alfia H. Surveillance radar data on nocturnal bird migration over Israel, 1989-1993 // Israel J. Zoology. – 1995. - 41(3). – p. 517-522.

Batschelet, E. Circular statistics in biology. Academic Press, London. – 1981. – 272 pp.

- 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. 3-8.
- Bruderer B. Radar studies on nocturnal bird migration in the Negev // Ostrich. – 1994. – 65. – p. 204-212.
- Bruderer B. The study of bird migration by radar. Part I-II // Naturwissenschaften. – 1997. – 84. – p. 30-45.
- Bruderer B., Leichti F. Variation in density and height distribution of nocturnal migration in the south of Israel // Israel J. Zoology. – 1995. – 41(3). – p. 477-489.
- Bruderer B., Steigender P. Methods of quantitative and qualitative analysis of bird migration with a tracking radar // NASA SP-262, Animal orientation and navigation. – 1972. – p. 151-162.
- Bruderer B., Steuri T., Baumgarthner M. Short-range high-precision surveillance of nocturnal migration and tracking of single targets // Ibidem. – p. 207-221.
- Bruderer, B. The study of bird migration by radar - Part 1: The technical basis. *Naturewissenschaften* 1997, 84:1-8.
- Buurma L.S. Long-range surveillance radars as indicators of bird numbers aloft // Israel J. Zoology. – 1995. – 41(3). – p. 221-237.
- Cohen B, Williams TC: Short-range corrections for migrant bird tracks on search radars. *J Field Ornith*, 1980. 51:248-253.
- Cooper B. A., Day R.H., Ritchie R.J., Cranor C.L. An improved marine radar system for studies of bird migration // J. Field Ornith. – 1991. – 62. – p. 367-377.
- Desholm, M: How much do small-scale changes in flight direction increase overall migration distance? *Journal of Avian Biology* 2003, 34:155-158.
- Drury W.H. Radar studies of orientation of songbird migrants in south-eastern New England / W.H. Drury, I.C.T. Nisbet // *Bird Banding*. – 1964. – Vol. 35. – P. 69-119.
- Eastwood E. Radar Ornithology / E. Eastwood. – London: Methuen & Co., 1967. – 278 p.
- Edwards J. Radar echoing area polar. Diagrams of birds / J. Edwards, E.W. Houghton // *Nature*. – 1959. – Vol. 184. – P. 46-92.
- Gauthreaux S.A. Radar Ornithology - Tracking Migrations by radar // *Wildbird*. – 1994. – p. 38-39.
- Gauthreaux S.A. Wind and the direction of nocturnal songbird migration / S.A. Gauthreaux // *Nature*. – 1970. – Vol. 228. – P. 476-477.
- Harmata A.R., Leighty G.R., O'Neil E.L. A vehicle-mounted radar for dual-purpose monitoring of birds. *Wildlife Society Bulletin* 2003, 31:882-886.
- Harmata A.R., Podruzny K.M., Zelenak J.R., Morrison M.L. Using marine surveillance radar to study bird movements and impact assessment. *Wildlife Society Bulletin* 1999. 27:44-52.
- Huppopp O., Dierschke J., Exo K., Fredrick E., Hill R.. Bird migration studies and potential collision risk with offshore wind turbines. *Ibis* 2006, 146:90-109.
- Kahlert J., Petersen I.K., Fox A.D., Desholm M., Clausager I. Investigations of birds during construction and operation of Nysted offshore wind farm at Rodsand. Annual status report 2003. *NERI report for Energy E2 A/S*. Rønde, Denmark, 2004.

- Konrad T.G., Hicks J.J., Dobson E.B. Radar characteristics of birds in flight // *Science*, 1968. - Vol. 159. – p. 274-280.
- Krijgsveld K.L., Lensink R., Schekkerman H., Wiersma P., Poot M.J.M., Meesters E.H.W.G., Dirksen S. Baseline studies North Sea wind farms: fluxes, flight paths and altitudes of flying birds 2003-2004. Netherlands: Bureau Waardenburg bv, Culemborg; 2005.
- Larkin R.P. Flight speeds observed with radar, a correction: slow 'birds' are insects // *Behav. Ecol. Sociobiol.* – 1991. – 29. – p. 221-224.
- Larkin R.P., Eisenberg L. A method for automatically detecting birds on radar. *Bird-Banding*, 1978; 49:172-181.
- Nisbet I.C.T. Measurements with radar of the nocturnal migration over Cape Cod, Massachusetts / I.C.T. Nisbet // *Bird Banding*. - 1963.- P. 57-67.
- Nisbet I.C.T. Quantitative study of migration with 23-centimeter radar / I.C.T. Nisbet // *Ibis*. - 1963. - P. 435-460.
- Peckford M.L., Taylor P.D. Within night correlations between radar and ground counts of migrating songbirds. *Journal of Field Ornithology*, 2008; 79:207-214
- Petersen I.K., Christensen T.K., Kahlert J., Desholm M., Fox A.D. Final results of bird studies at the offshore wind farms at Nysted and Horns Rev, Denmark. NERI report for DONG energy and Vattenfall A/S. Rønde, Denmark. 2006
- Richardson W.J. Autumn landbird migration over the western Atlantic Ocean as evident from radar. *Proceedings of the 17th Int. Ornithological Congress:Berlin*; 1978: 501-506.
- Ruth J.M. Applying radar technology to migratory bird conservation and management: strengthening and expanding a collaborative: U.S. Geological Survey 2007. Report number 2007-1361. 86 p.
- Schmaljohann, H., Liechti, F., Bächler, E., Steuri, T., Bruderer, B. (2008). Quantification of bird migration by radar – a detection probability problem. *Ibis*. 150 (2), 342-355.
- Tulp I., Schekkerman H., Larsen J.K., van der Winden J., van der Haterd R.J., van Horssen W.P., Dirksen S., Spaans A.L. Nocturnal flight activity of sea ducks near the windfarm Tuno Knob in the Kattegat. Prepared for Novem, Utrecht, Netherlands. Bureau Waardenburg bv, Culemborg, Netherlands. 1999
- van Gasteren, H., J. van Belle, Buurma L.S. 2002. Kwantificering van vogelbewegingen langs de kust bij IJmuiden: een radarstudie. Koninklijke Luchtmacht, Den Haag.
- Williams T.C., Settel J., O'Mahoney P., Williams J.M. An ornithological radar. *American Birds* 1972; 26:555-557.
- Ганя И.М. Радиолокационная орнитология / Ганя И.М., Зубков Н.И., Котяцы М.И. – Кишинев: Штиинца, 1991. – 218 с.
- Мацюра А.В. Использование различных типов радаров в орнитологических исследованиях / А.В. Мацюра // *Вісник ДНУ. Сер. Біологія. Екологія*. - 2005. - Вип. 13, т. 1. - №3(1). - С. 159-164.

**REFERENCES**

- Alfia, H. (1995). Surveillance radar data on nocturnal bird migration over Israel, 1989-1993. *Israel J. Zoology*. 41(3), 517-522.
- Batschelet, E. (1981). *Circular statistics in biology*. Academic Press, London.
- Bruderer, B. (1982). Do migrating birds fly along straight lines? In: Papi F., Wallraff H.G. (Eds.) *Avian navigation*. Springer. Berlin, Heidelberg, New York.
- Bruderer, B. (1994). Radar studies on nocturnal bird migration in the Negev. *Ostrich*. 65, 204-212.
- Bruderer, B. (1997). The study of bird migration by radar. Part I-II. *Naturwissenschaften*. 84, 30-45.
- Bruderer, B., Leichti, F. (1995). Variation in density and height distribution of nocturnal migration in the south of Israel. *Israel J. Zoology*. 41(3), 477-489.
- Bruderer, B., Steigender, P. (1972). Methods of quantitative and qualitative analysis of bird migration with a tracking radar. *NASA SP-262, Animal orientation and navigation*.
- Bruderer, B., Steuri, T., Baumgarthner, M. (1972). Short-range high-precision surveillance of nocturnal migration and tracking of single targets. *Ibidem*.
- Bruderer, B. (1997). The study of bird migration by radar - Part 1: The technical basis. *Naturewissenschaften*. 84, 1-8.
- Buurma, L.S. (1995). Long-range surveillance radars as indicators of bird numbers aloft. *Israel J. Zoology*. 41(3), 221-237.

- Cohen, B., Williams, T.C. (1980). Short-range corrections for migrant bird tracks on search radars. *J Field Ornith.* 51, 248-253.
- Cooper, B. A., Day, R.H., Ritchie, R.J., Cranor, C.L. (1991). An improved marine radar system for studies of bird migration. *J. Field Ornith.* 62, 367-377.
- Desholm, M. (2003). How much do small-scale changes in flight direction increase overall migration distance? *Journal of Avian Biology.* 34, 155-158.
- Drury, W.H., Nisbet, I.C.T. (1964). Radar studies of orientation of songbird migrants in south-eastern New England. *Bird Banding.* 35, 69-119.
- Eastwood E. (1967). *Radar Ornithology.* London: Methuen & Co.
- Edwards, J., Houghton, E.W. (1959). Radar echoing area polar. Diagrams of birds. *Nature.* 184, 46-92.
- Gania, I.M., Zubkov, N.I., Kotiatsy, M.I. (1991). *Radar ornithology.* Kishinev; Shtiintsa.
- Gauthreaux, S.A. (1994). *Radar Ornithology - Tracking Migrations by radar.* Wildbird.
- Gauthreaux, S.A. (1970). Wind and the direction of nocturnal songbird migration. *Nature.* 228, 476-477.
- Harmata, A.R., Leighty, G.R., O'Neil, E.L. (2003). A vehicle-mounted radar for dual-purpose monitoring of birds. *Wildlife Society Bulletin.* 31, 882-886.
- Harmata, A.R., Podruzny, K.M., Zelenak, J.R., Morrison, M.L. (1999). Using marine surveillance radar to study bird movements and impact assessment. *Wildlife Society Bulletin.* 27, 44-52.

- Huppopp, O., Dierschke, J., Exo, K., Fredrick, E., Hill, R. (2006). Bird migration studies and potential collision risk with offshore wind turbines. *Ibis*. 146, 90-109.
- Kahlert, J., Petersen, I.K., Fox, A.D., Desholm, M., Clausager, I. (2004). Investigations of birds during construction and operation of Nysted offshore wind farm at Rodsand. Annual status report. *NERI report for Energy E2 A/S*. Rønde, Denmark.
- Konrad, T.G., Hicks, J.J., Dobson, E.B. (1968). Radar characteristics of birds in flight. *Science*. 159, 274-280.
- Krijgsveld, K.L., Lensink, R., Schekkerman, H., Wiersma, P., Poot, M.J.M., Meesters, E.H.W.G., Dirksen, S. (2005). Baseline studies North Sea wind farms: fluxes, flight paths and altitudes of flying birds 2003-2004. Netherlands: Bureau Waardenburg bv, Culemborg.
- Larkin, R.P. (1991). Flight speeds observed with radar, a correction: slow 'birds' are insects. *Behav. Ecol. Sociobiol.* 29, 221-224.
- Larkin, R.P., Eisenberg, L. A. (1978). A method for automatically detecting birds on radar. *Bird-Banding*. 49, 172-181.
- Matsyura, A.V. (2005). Use of various radars in ornithological research. *Bulletin Dnepropetrovsk University. Biology, Ecology*. 3(1), 159-164.
- Nisbet, I.C.T. (1963). Measurements with radar of the nocturnal migration over Cape Cod, Massachusetts. *Bird Banding*. 34, 57-67.
- Nisbet, I.C.T. (1963). Quantitative study of migration with 23-centimeter radar. *Ibis*. 105 (4), 435-460.

- Peckford, M.L., Taylor, P.D. (2008). Within night correlations between radar and ground counts of migrating songbirds. *Journal of Field Ornithology*. 79, 207-214.
- Petersen, I.K., Christensen, T.K., Kahlert, J., Desholm, M., Fox, A.D. (2006). Final results of bird studies at the offshore wind farms at Nysted and Horns Rev, Denmark. NERI report for DONG energy and Vattenfall A/S. Rønde, Denmark.
- Richardson, W.J. (1978). Autumn landbird migration over the western Atlantic Ocean as evident from radar. *Proceedings of the 17th Int. Ornithological Congress:Berlin*.
- Ruth, J.M. (2007). Applying radar technology to migratory bird conservation and management: strengthening and expanding a collaborative: U.S. Geological Survey 2007. Report number 2007-1361.
- Schmaljohann, H., Liechti, F., Bächler, E., Steuri, T., Bruderer, B. (2008). Quantification of bird migration by radar – a detection probability problem. *Ibis*. 150 (2), 342-355.
- Tulp, I., Schekkerman, H., Larsen, J.K., van der Winden, J., van der Haterd, R.J., van Horssen, W.P., Dirsken, S., Spaans, A.L. (1999). Nocturnal flight activity of sea ducks near the windfarm Tuno Knob in the Kattegat. Prepared for Novem, Utrecht, Netherlands. Bureau Waardenburg bv, Culemborg, Netherlands.
- van Gasteren, H. van Belle, J., Buurma, L.S. 2002. Kwantificering van vogelbewegingen langs de kust bij IJmuiden: een radarstudie. Koninklijke Luchtmacht, Den Haag.

---

Williams, T.C., Settel, J., O'Mahoney, P., Williams, J.M. (1972). An ornithological radar. *American Birds*. 26, 555-557.

*Поступила в редакцию 22.10.2015*

**Как цитировать:**

Мацюра, А.В. (2015). Радиолокационные орнитологические наблюдения: краткий обзор стационарных и мобильных комплексов. *Acta Biologica Sibirica*, 1 (3-4), 118-147. **crossref** <http://dx.doi.org/10.14258/abs.v1i3-4.917>

© *Мацюра, 2015*

Users are permitted to copy, use, distribute, transmit, and display the work publicly and to make and distribute derivative works, in any digital medium for any responsible purpose, subject to proper attribution of authorship.



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 3.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/)