УДК 53

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ СЕЛЕКЦИИ РАДИОЭХО ПТИЦ

Диневич Л.

George S. Wise Faculty of Natural Sciences, Dept. of Zoology, Tel-Aviv University, Ramat Aviv, Israel, e-mail: Dinevich@013.net

Разработанный в Израиле алгоритм селекции радиоэхо птиц уже много лет в периоды их массовой межконтинентальной миграции успешно применяется для обеспечения безопасности полётов транспортной и боевой авиации. Получаемые в режиме текущего времени каждые 20 минут карты радиолокационной орнитологической обстановки позволяют руководителям полётов «разнести» во времени и в пространстве трассы миграции перелётных птиц и воздушных судов. Руководители полётов при планировании и управлении движением воздушных судов учитывают фактическую орнитологическую обстановку. Тем не менее, при определённых метеорологических условиях алгоритм распознавания радиоэхо птиц всё же пропускает некоторое количество ложных сигналов, которые формируются мелкокапельными облаками и атмосферными неоднородностями. В настоящей работе предлагается использовать дополнительные признаки радиэхо, которые повысят точность селекции полезных сигналов. Базируются эти признаки на использовании поляризационных характеристик отражённых сигналов.

Ключевые слова: радиоэхо, миграция, орнитологическая система

IMPROVING THE ACCURACY OF SELECTION RADIOECHO BIRDS

Dinevich L.

George S. Wise Faculty of Natural Sciences, Dept. of Zoology, Tel-Aviv University, Ramat Aviv, Israel, e-mail: Dinevich@013.net

Developed in Israel, the selection algorithm radioecho birds for many years during periods of mass Intercontinental migration has been successfully applied to safety transport and military aviation. Get in the timekeeping mode, every 20 minutes maps radar ornithological situation allow managers of flights to distance in time and space routes of migratory birds and aircraft. The flight leaders in planning and managing the movement of aircraft into account the actual bird situation. However, under certain weather conditions, the recognition algorithm radioecho birds still misses some number of false signals that are generated atomized clouds and atmospheric inhomogeneities. In the present work proposes to use the additional features radio that will increase the accuracy of selection of useful signals. These signs are based on the use of polarization characteristics of the reflected signals.

Keywords: radio echo, migration, ornithological system

Радиолокационная орнитологическая система на базе радиолокатора МРЛ5 (Dinevich L., Leshem Y., 2007; Л. Диневич, Й. Лешем,2008; Dinevich L., Leshem Y., Pinsky M., Sterkin A., 2004) позволяет выполнить мониторинг межконтинентальных перелётов больших масс птиц в реальном времени. У такого мониторинга есть две цели.

Орнитологам важно знать траектории миграции различных видов птиц в различные времена года и суток. Важными являются данные о большой концентрации мигрантов над различными районами страны, о высотах, направлениях и скоростях их движения. Получить такую информацию с помощью традиционных способов наблюдения за птицами невозможно. Системные радиолокационные данные позволяют получить вышеуказанные характеристики полётов птиц, а также установить зависимость их миграции от погодных ситуаций в любое время суток.

Не менее важной целью разработки радиолокационной орнитологической системы является учёт её оперативных данных для совместного безопасного использования воздушного пространства страны, как мигрантами, так и авиацией и, в первую очередь, боевыми самолётами. Орнитологическая обстановка принимается во внимание при планировании полётов.

Найденные для различных атмосферных отражателей признаки радиолокационных сигналов и разработанный на их основе алгоритм позволяет распознавать радиоэхо от птиц и в оперативном масштабе времени строить векторные поля их движения, в том числе по высотам.

Построенные на основе разработанных алгоритмов радиолокационные орнитологические карты содержат следующую информацию:

1) общее количество радиоэхо птиц в воздухе, в том числе мигрантов;

2) значения их максимальной и минимальной скорости полёта;

3) количественное распределение всех радиоэхо птиц по высотам;

4) спектры скоростей и направлений полёта птиц по данным движения их радиоэхо, в том числе вектор суммарного направления;

5) векторные поля движения радиоэхо птиц на фоне метеорологической обстановки и с привязкой к местности;

6) распределение видов птиц по характеру движения их радиоэхо (степени прямолинейности и равномерности);

7) об облаках, осадках, невидимых визуально атмосферных образованиях и их параметрах, в том числе об их эволюции во времени.

Радиус таких радиолокационных орнитологических полей относительно места размещения радиолокатора зависит от размеров птиц (Dinevich L., Leshem Y., 2007).

На основе скоростных возможностей выбранных компьютеров, минимизации времени, необходимого для обработки большого количества радиоэхо, максимальный радиус наблюдения системы принят 60 км.

Тем не менее выполненные в Молдавии в конце 80-х годов совмещённые, визуальные и радиолокационные (в многолетнем эксперименте участвовали несколько МРЛ5 одновременно) наблюдения позволяли уверенно прослеживать радиоэхо больших стай аистов с удаления, превышающего 100 км и сопровождать их полёт на протяжении трёх и более часов.

Визуальная часть этого эксперимента обеспечивалась группой исследователей АН Молдавии под руководством доктора И. Гани. Радиолокационная часть эксперимента обеспечивалась группой специалистов под руководством инженера по радиолокации В. Диневича (Ganja I., Zubkov M., Kotjazi M., 1991).

Потенциал МРЛ5 по расчётам (Dinevich L., L. Kaplan, 1999) и при наблюдениях на экране радиолокатора позволяет увидеть радиоэхо одиночного аиста (аист, журавль, пеликан и т. д.) на удалении 100 км, если высота его полёта не менее 700 м (Ganja I., Zubkov M., Kotjazi M., 1991; Dinevich L, Y. Leshem, O. Sikora, 2001). Для стай птиц размером с воробья дальность их обнаружения может превышать 30, а нередко и 40 км. Согласно расчётам потенциал МРЛ5 позволяет увидеть одну птицу размером с воробья на удалении 8 км. Однако воробьиные, как правило, не летают поодиночке.

Опыт многолетнего использования алгоритма распознавания радиоэхо птиц (Dinevich L., Leshem Y., 2007) показал надёжность их селекции на фоне местных холмов, летательных аппаратов и большинства облачных образований.

Наиболее проблематичными для алгоритма селекции радиоэхо птиц (Dinevich L., Leshem Y., 2007; Диневич Л., Лешем Й., 2008) являются слабые и сильно флюктуирующие отражения от мелкокапельных облаков, зон диссипации облачных образований, точечные радиоэхо насекомых, а также радиоэхо продольных и крючковатых полос атмосферных неоднородностей. Природа таких атмосферных неоднородностей хорошо проанализирована в брошюре А. Черникова «Радиолокационные отражения от ясного неба» (Chernikov A., 1979).

При наличии в атмосфере таких отражателей нередко на орнитологических картах после селекции радиоэхо на основе разработанного алгоритма остаются ложные сигналы (помехи). Признаками, дополняющими разработанный в Израиле алгоритм селекции радиоэхо птиц, могут быть поляризационные, допплеровские и флюктуационные характеристики радиоэхо.

В данной работе представлено обоснование селекции радиоэхо птиц на основе их поляризационных характеристик и величины эффективной площади рассеяния (ЭПР – σ) .

Примеры ложных сигналов, принимаемых радиолокационной системой за радиоэхо птиц

На рис. 1–5 представлены для примера несколько орнитологических карт за несколько различных дней. Все обозначения на картах идентичны и детально представлены в (Dinevich L., Leshem Y., 2008; Dinevich L., 2009).

В ряде случаев эти вектора создаются ложными (не радиоэхо птиц) сигналами. Проанализируем эти карты.

На рис. 1 наблюдаем радиоэхо облаков, осадков и холмов (местников). Радиус обзора более 50 км. В правом нижнем углу рисунка цветами обозначены уровни радиоэхо. Самое слабое радиоэхо обозначено синими цветами. Фактическая погода в момент получения данной карты – конвективная облачность и прерывистые ливневые дожди, ветер умеренный, северо-западный. Облака медленно смещаются в юго-восточном направлении. Если в такой атмосфере птицы есть, то их может быть очень мало.

На рис. 2 та же карта, которая представлена на рис. 1, но после селекции радиоэхо на основе алгоритма распознавания радиоэхо птиц. В этом случае параметры селекции выставлены на сверхчувствительном уровне (см. Dinevich L., Leshem Y., 2008). Т.е. на уровне, который оставляет для анализа даже радиоэхо шумов. В результате, фильтры алгоритма пропустили радиоэхо и построили вектора в зонах краёв или областей диссипации облаков. Можно предположить, что лишь часть этих векторов принадлежит радиоэхо птиц.

На рис. 3 представлена та же карта, но после селекции радиоэхо птиц на менее чувствительном уровне. На этой орнитологической карте векторов значительно меньше, чем на карте 2. Она объективнее отражает орнитологическую ситуацию. Заметим, что для получения последней карты

пришлось установить параметры селекции радиоэхо на менее чувствительном уровне. Следовательно, при этом часть радиоэхо очень мелких птиц мы теряем.

Рассмотрим рис. 4 и 5.

На рисунках векторами обозначены движения птиц в дневное время.

В основном вектора либо распределены по всей площади карты, либо формируют длинные полосы. Вектора имеют чётко обозначенные направления миграции для соответствующего периода года. В правом нижнем углу каждой карты представлен спектр скоростей, а также средние скорости и направления миграции.

Области 1, 2 и 3 на обеих картах характеризуются некой совокупностью векторов с отличающейся от остальных векторов хаотичной ориентацией и с большой концентрацией на единицу объёма. Такие области, как правило, совпадают с визуально наблюдаемыми слабыми конвективными или слоистыми облачными образованиями. Чаще всего они развиваются в подинверсионном слое (1–1,5 км), но порой и ниже за счёт больших градиентов температуры и влажности. В Израиле такие атмосферные микрофронты возникают в долинах холмов и на границах «море – суша». Причём полосы микрофронтов, возникающих за счёт процессов на границе «море – суша» смещаются в течение дня от моря всё глубже в сторону континента. Используемые в алгоритме признаки принимают сигналы в зонах таких сильно флюктуирующих слабых радиоэхо облаков за радиоэхо птиц и формируют ложные вектора. Характерной особенностью таких векторных образований является их большая плотность и хаотичность направлений. Разработанный в Израиле алгоритм способен их различать. Однако, как показано в описании рис. 1–3, для этого приходится уменьшать чувствительность метода и, естественно, в ряде случаев терять некоторую часть полезных радиоэхо.

Такие же проблемные зоны нередко возникают в областях видимых и невидимых атмосферных образований.

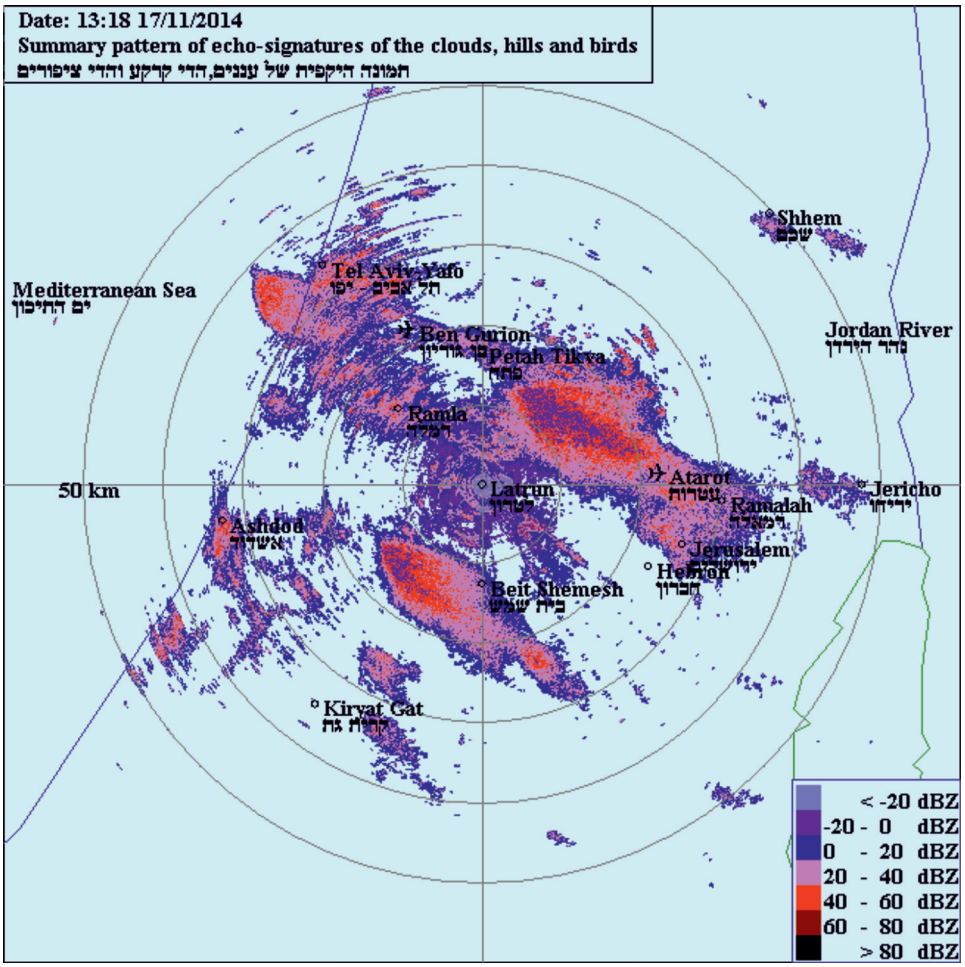


Рис. 1

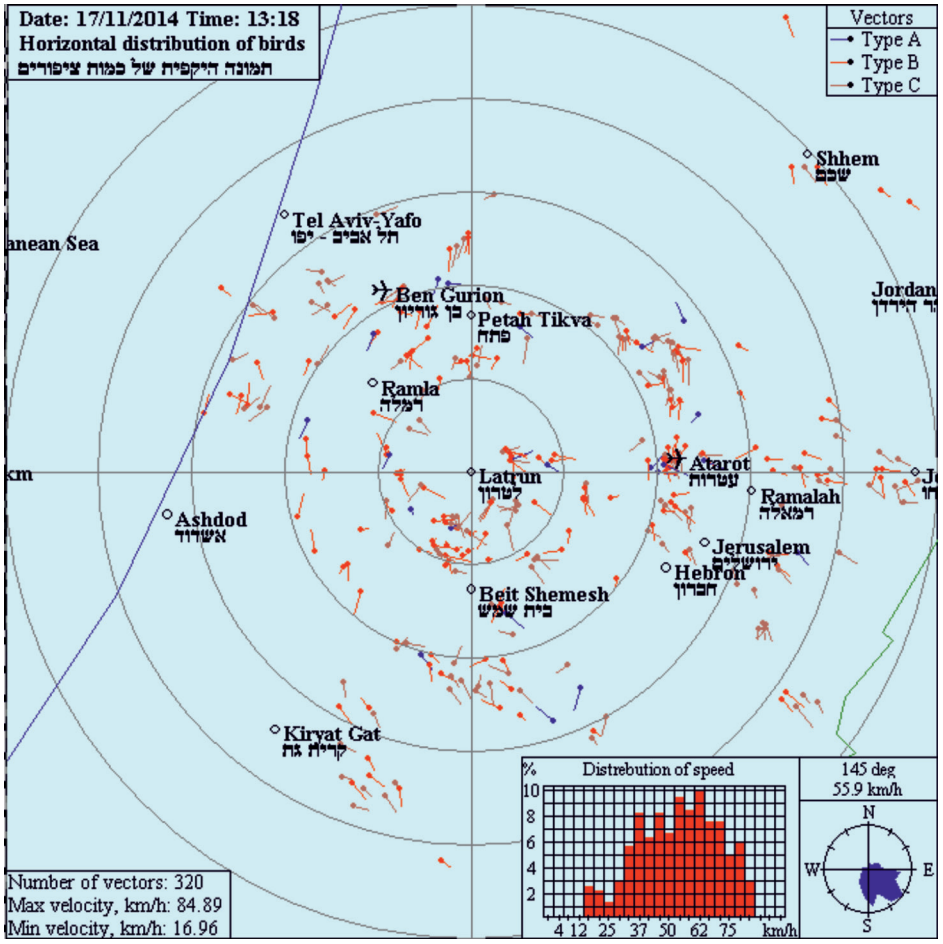


Рис. 2

На рис. 6 а, б представлены радиоэхо визуально не видимых атмосферных неоднородностей, возникающих в Израиле часто в нижнем подинверсионном слое на высоте 1–1,5 км, а порой, в утренние часы, на уровнях долин между холмами. Здесь сплошные большие и малые пятна радиоэхо холмов. Полосы различной длины, а иногда и не прямолинейной формы – радиоэхо чаще всего не видимых глазом атмосферных образований.

В книге «Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5» (РД 52.04.320-91), С-Пб, Гидрометеоиздат, 1993, 357 с. (раздел 2.10.8.2 Аномальное радиоэхо в виде тонких линий и полос) отмечается:

1. Радиоэхо такого типа перемещается впереди интенсивных гроз и связывается с линией ветрового сдвига. В районе сдвига может повышаться концентрация частиц пыли и пыльцы, происходит резкое увеличение градиента коэффициента преломления.

2. Многие исследователи отмечали подобные тонкие линии в отсутствие облаков, связывая их с зонами ветрового сдвига. Особенно часто их наблюдают в прибрежных районах и легко связывают с бризом. Радиус обнаружения тонких линий в этих случаях редко превышает 50 км, а высота 1–2 км.

3. Радиоэхо в виде полос в радиусе до 40 км может давать перистые облака, однако они расположены значительно выше, чем летают птицы.

4. Дополнительно к этим случаям нередко в утренние часы радиоэхо в виде длинных полос могут создавать неоднородности, возникающие за счёт зон повышенной влажности между холмами. Возникают они либо за счёт ветровой тяги в нижнем приземном слое между холмами морского насыщенного влагой воздуха с моря, либо за счёт утренней приземной конвекции насыщенного, охлаждённого ночью в долинах между холмами воздуха. Как правило, такие полосы радиоэхо исчезают после солнечного прогрева приземных слоёв в утренние часы.

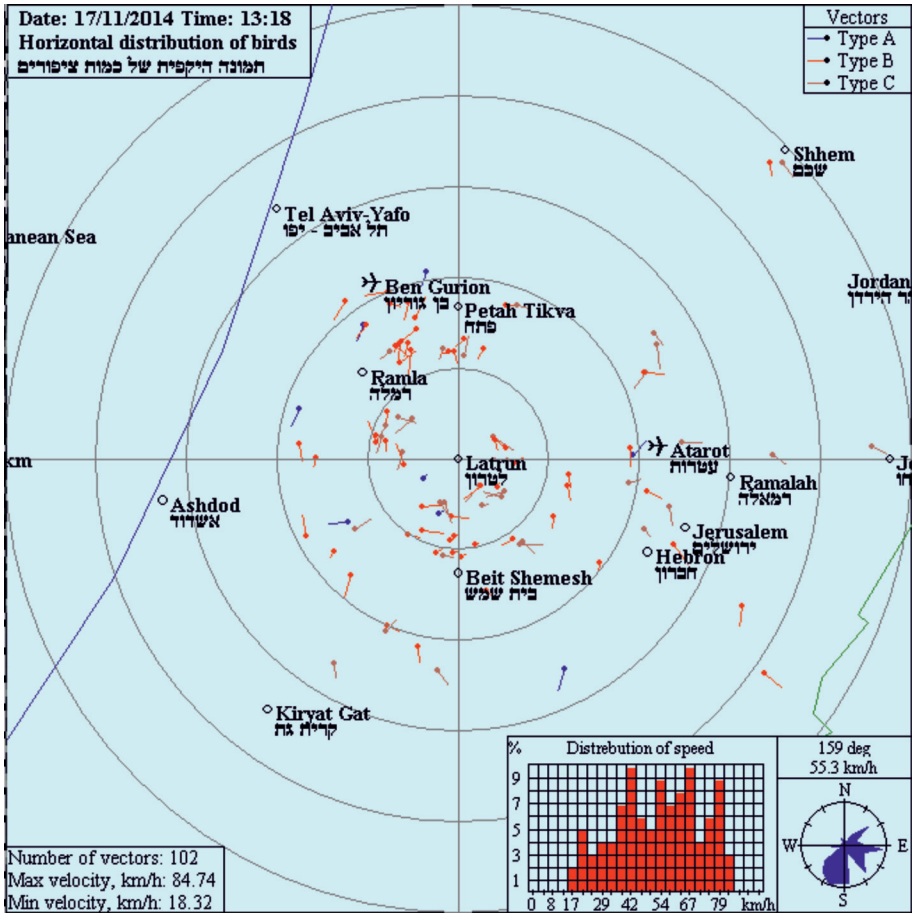


Рис. 3

Как и в предыдущих случаях используемые в алгоритме признаки принимают сигналы радиоэхо в случаях 1, 2, 4 за радиоэхо птиц и формируют ложные вектора. Характерной особенностью таких векторных образований тоже является их большая плотность и хаотичность направлений. Представленный в (Dinevich L., Leshem Y., 2007, 2008) алгоритм, как и в предыдущих случаях, способен различать ложные вектора от векторов, создаваемых движением птиц. Однако, как показано в описании рис. 1–3, для этого приходится уменьшать чувствительность метода и, естественно, в ряде случаев, как сказано ранее, терять некоторую часть полезных радиоэхо.

Нередко ложные сигналы в ближней зоне формируют радиоэхо боковых лепестков (рис. 7).

На рис. 7 представлено вертикальное сечение радиоэхо большой стаи птиц в дневное время на экране радиолокатора. Радиус обзора 50 км. Общая длина стаи превышает 100 км. На экране видна лишь половина её длины в одном направлении. Высота радиоэхо 800–1200 м. Максимальная концентрация радиоэхо на высоте 800 м. Радиоэхо птиц выглядит в виде вытянутых по вертикали коротких полосок. Длина таких полосок зависит от величины диаграммы направленности антенны и мощности самого радиоэхо, т.е. от отражающих способностей цели. В одной и той же диаграмме длина полоски радиоэхо одного или группы аистов и одного или группы воробьиных будет разная. Обращают на себя внимание некоторая часть слабых радиоэхо в ближней зоне на высоте, существенно превышающей 1200 м. Эти радиоэхо сформированы сигналами от местников боковым лепестком и ошибочно алгоритмом приняты за радиоэхо птиц.

Для селекции ложных сигналов, не имеющих отношения к радиоэхо птиц (рис. 1–7), необходимо ввести в алгоритм распознавания дополнительные признаки.

Такими признаками могут быть поляризационные характеристики радиоэхо.

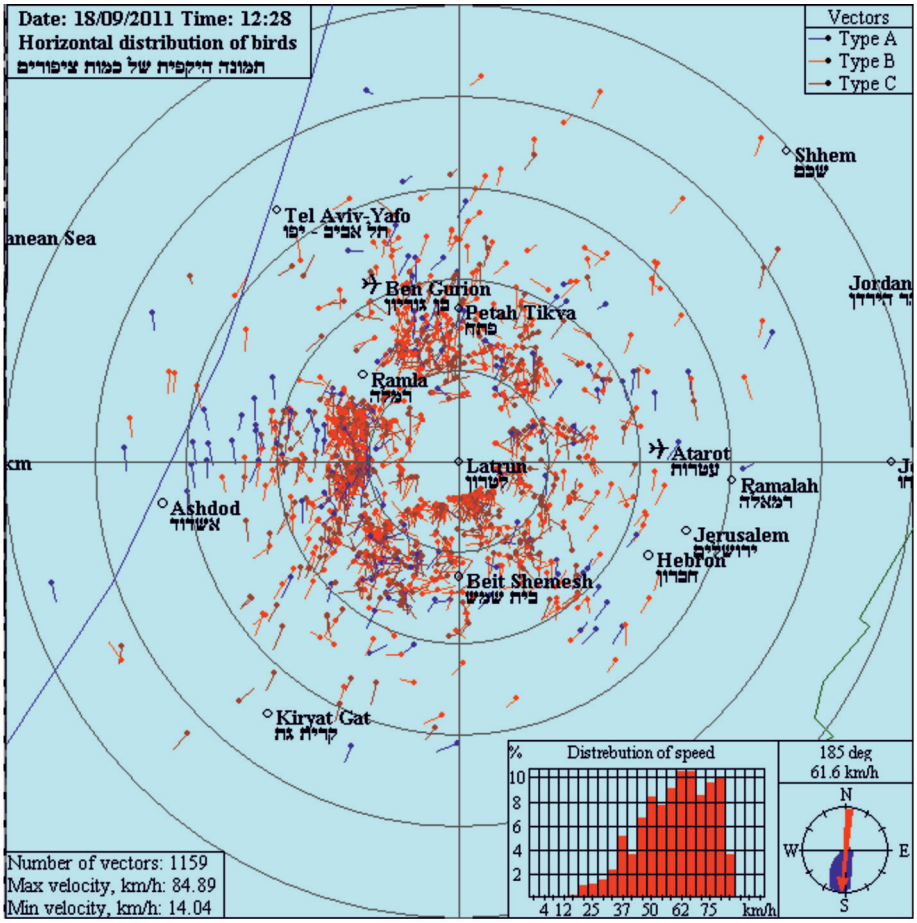


Рис. 4

Поляризационные характеристики радиоэхо

Из основного уравнения радиолокации (Dinevich L., L. Kaplan, 1999) следует, что дальность обнаружения одиночных целей увеличивается с повышением мощности передатчика, коэффициента усиления антенны, уменьшения мощности собственных шумов приёмника РЛС и увеличением σ цели.

При измеренных значениях R до цели и мощности отражённого сигнала Pτ можно рассчитать значение эффективной площади рассеяния (ЭПР) одиночной цели σ:

$$\sigma = \frac{(4\pi)^3 P_r R^4}{P_\tau G^2 \lambda^2} \frac{1}{K_1} \frac{1}{K_2}.$$

По этой формуле можно рассчитывать эффективную площадь рассеяния одиночной птицы, при этом значения K_1 и K_2, при отсутствии атмосферных осадков, можно принять за единицу.

Исходя из физического смысла эффективной площади рассеяния, чем больше птица, тем больше значение σ.

В работах (Shupijatcky A. 1959; Chernikov A., Schupjatsky A. 1967) отмечается заметная зависимость ЭПР птиц от поляризации излучаемого и принимаемого сигнала и от их ориентации относительно излучателя радиолокатора. По данным этих авторов степень деполяризации радиолокационных сигналов от птиц составляет около – 7÷– 9 dB. Для поляриметра с линейной поляризацией излучения и приёма деполяризация определяется как отношение мощностей ортогональной и основной компонент отражённого сигнала. В случае излучения волн горизонтальной поляризации выражение для деполяризации можно записать в виде

$$\Delta Px = Pxy/Pxx$$

или

$$\Delta Px\ (dB) = \lg Pxy/Pxx.$$

При излучении вертикально поляризованной волны выражение для деполяризации примет вид ΔPy = Pyx/Pyy. Здесь Pxx, Pyy, Pxy, Pyx – компоненты мощности при-

нятого сигнала, где первый индекс означает вид поляризации при излучении, второй индекс – при приёме. При этом x и y обозначают горизонтальную и вертикальную поляризации соответственно.

В случаях по импульсного переключения поляризации излучения и приёма, при этом, сигналов той же поляризации можно рассчитывать величину дифференциальной отражаемости

$$dP = Pxx / Pyy$$

или

$$dP = 10\lg Pxx / Pyy.$$

В работах (Shupijatcky A. 1959; Dinevich L., 1981; Dinevich L., Kapitalchuk I., Schupjatsky A. 1990, 1994) показано, что величины деполяризации и дифференциальной поляризации функционально связаны только с формой цели и её ориентацией в пространстве и не зависят ни от каких других параметров, в том числе диэлектрической проницаемости тела, ослабления сигнала на трассе и т.д. Используя две поляризационные компоненты ΔPx и dP, можно вычислить ориентацию птиц в пространстве и их форму, т.е. отношение длины к ширине.

Формула для расчёта угла ориентации птицы в пространстве (Shupijatcky A., 1959) имеет следующий вид

$$tg2\theta = 2\, dP^{1/2} \Delta P^{1/2} [dP^{1/2} - 1],$$

здесь θ – угол ориентации птицы в пространстве.

Немало важной является возможность по величине дифференциальной отражаемости выделять сигналы от птиц на фоне отражений от различных атмосферных неоднородностей, природа которых не связана с образованием видимых гидрометеоров. Дифференциальная отражаемость от таких неоднородностей близка к 1. Дифференциальная отражаемость от птиц на много больше единицы. Это означает, что указанный признак отражённого сигнала может быть использован при фильтрации сигналов от такого типа атмосферных неоднородностей.

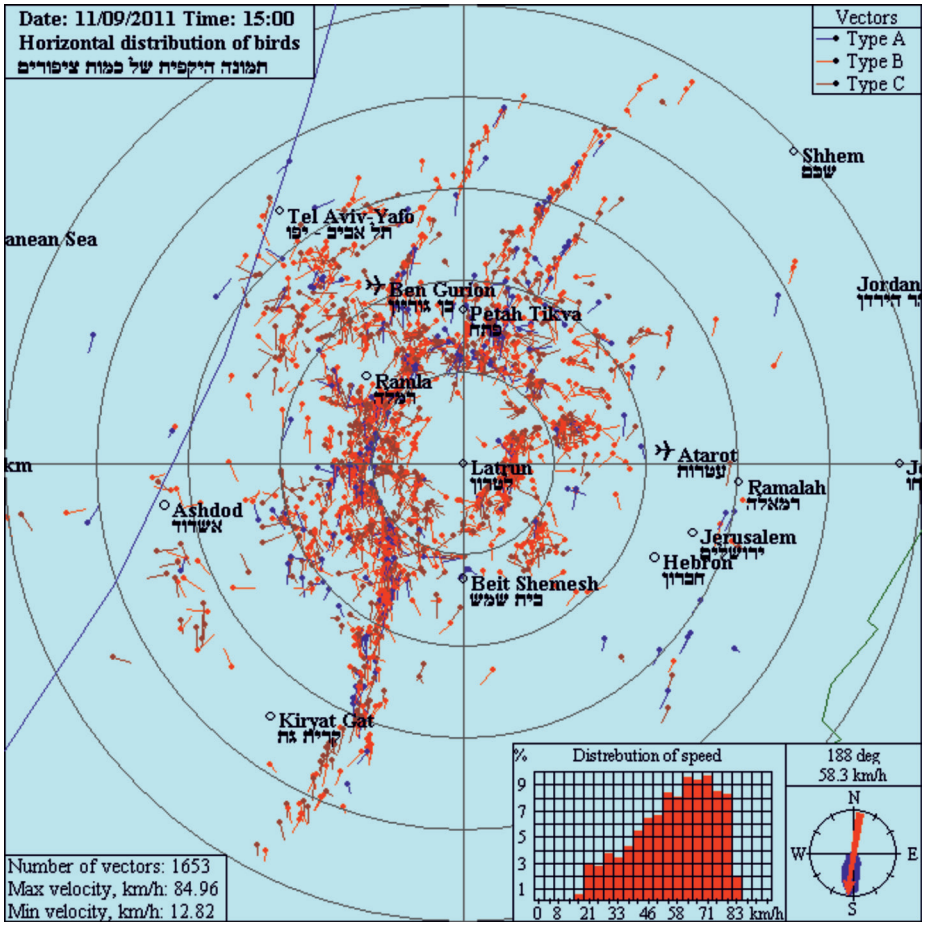
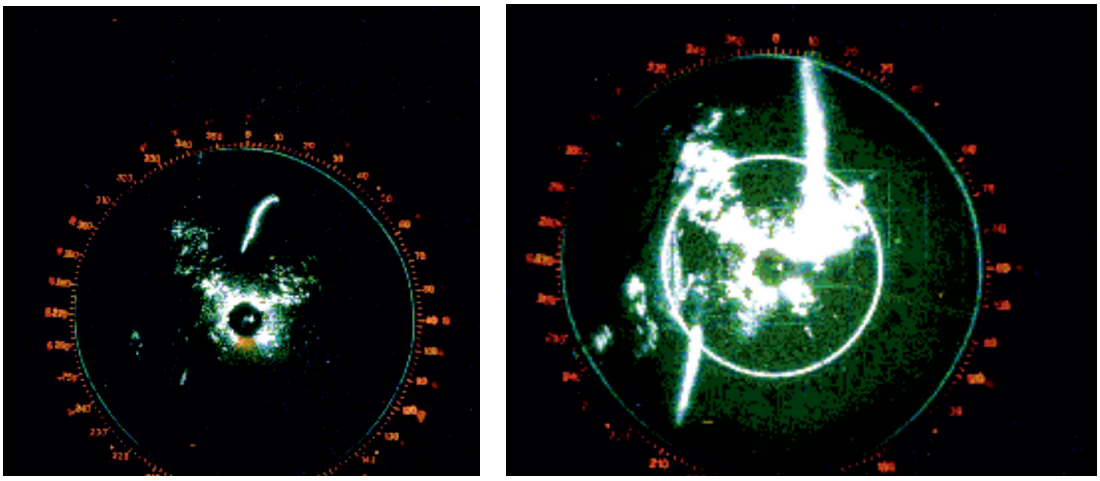


Рис. 5



а) *б)*

Рис. 6

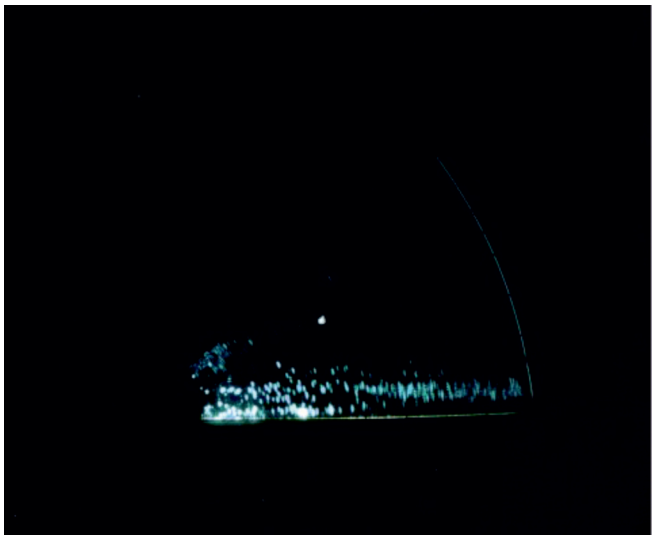


Рис. 7

В работе (Dinevich L., Kapitalchuk I., Schupjatsky A., 1994) также показано, что дифференциальная отражаемость от мелкокапельных облаков приближается к 1. Это легко показать на следующем примере. По определению, дифференциальная отражаемость $dP = 10\lg Pxx/Pyy$. Форма мелких капель размером до 0,5 сантиметра всегда сферична (Литвинов И., 1974; Минервин В., Моргунов С., Шупяцкий А., 1971), т.е. радиусы взаимно перпендикулярных осей близки по своим значениям. Это значит, что $Pxx \approx Pyy$. Отсюда $Pxx/Pyy \approx 1$ и соответственно $dP \approx 1$.

По наблюдениям (Dinevich L., Kapitalchuk I., Schupjatsky A., 1994) радиолокационная отражаемость мелкокапельных облаков не превышает 30 dBZ, что соответствует и предельному уровню отражаемости птиц.

Исходя из этого, сигналы с параметрами ≤ 30 dBZ и $dP \approx 1$ характерны для отражений от мелких капель и отфильтровываются, а сигналы с параметрами ≤ 30 dBZ и $dP >> 1$ в дополнение к другим особенностям сигнала (подвижность в пространстве и т.д.) могут принадлежать птицам. Такой приём позволит наблюдать птиц на фоне мелкокапельных облаков.

Другим важным характерным признаком сигналов, позволяющим различить отражения от насекомых и различных взвешенных

примесей в атмосфере (семена растений, частицы пыли и т.д.) от отражений от птиц, является комплексный параметр, в котором присутствуют две компоненты сигнала – величина σ и её деполяризация

$$\Delta Px = Pxy/Pxx$$

или

$$\Delta Px\ (дБ) = lgPxy/Pxx.$$

Для птиц и насекомых всегда характерно наличие деполяризации сигналов, составляющей в среднем 11–13 дБ (Shupijatcky A., 1959). Однако величина σ для птиц превышает значение 10^{-1} $см^{-1}$, в то время как для насекомых она значительно меньше этого значения.

Очень важным преимуществом использования поляриметра является то обстоятельство, что поляризационные соотношения при равных объёмах зондирования не зависят от концентрации в них целей. А от этого зависит закономерность рассеяния – множественная эта цель или одиночная. Это обстоятельство очень важно для селекции радиоэхо птиц в зоне мелкокапельных облаков. Радиоэхо крупнокапельных облаков легко распознаётся вышеописанным алгоритмом. Для птиц, сколько их ни было бы в радиолокационном объёме, они всегда ориентированы в пространстве. Мелкие же и поэтому сферические капли не имеют ориентации и распознаются на основе изложенных соотношений и соображений.

Расчёт количества птиц, их размеров и определение видов

Близкая к высокой надёжности селекция радиоэхо птиц на фоне других отражателей даёт возможность сделать следующий шаг в определении количества птиц, их размеров и видов.

В работе Dinevich L., Leshem Y., 2007 приведена оценка зависимости вероятности обнаружения радиоэхо птиц в связи с ослаблением сигналов с расстоянием R. Оценки были выполнены экспериментально по аналогии с задачей штормооповещения о ливнях и грозах. Для этих метеообъектов на большом объеме радиолокационных наблюдений были получены следующие данные о вероятности обнаружения (%) кучево-дождевых (Cb) облаков с грозами и ливнями с помощью МРЛ в зависимости от расстояния.

Если полагать, что надежный радиус обнаружения R является таким, который обеспечивает высокую вероятность обнаружения указанных метеообъектов с надежностью не менее 90–100%, то из таблицы следует, что для МРЛ значение R равно 90–100 км. Из этого следует, что в пределах указанных радиусов за редким исключением МРЛ не пропускает ни одно из указанных опасных явлений. Аналогичным образом была решена задача обнаружения радиоэхо птиц. Однако, для радиолокации птиц необходимо дополнительно принять во внимание коэффициент, учитывающий увеличение объёма облучения при переходе с принятой экспериментально дальности 100-процентного обнаружения, на дальность искомую, например 20, 30, 40, 50, 60 км.

К примеру, в алгоритмах расчётов можно принять следующие рассуждения.

1. Рассматривается экран МРЛ-5 и фиксируется, на каком расстоянии не обнаруживаются отражения от птиц. Например, на 53 снимках у нас предельное расстояние изменяется от 45 км до 60 км в азимутальном секторе, где нет углов закрытия. Можно считать, что во время перелета птиц они в этом секторе равномерно заполняют его за пределами дальности их обнаружения радиолокатором. Следовательно, с вероятностью 100% мы видим птиц на удалении до 45 км во всех 53 случаях.

2. Предположим мы установили, что на расстоянии от 45 км до 60 км в 53 случаях зафиксировано 175 радиоэхо птиц. Тогда можно построить табл. 2.

Таблица 1

Cb облака	Расстояние от МРЛ, км						
	Над МРЛ	50	100	150	200	250	300
С грозой %	100	100	100	100	85	40	5
С ливнем %	100	100	95	70	45	15	–

Таблица 2

	Обнаружение птиц МРЛ-5 на различных расстояниях, км		
	45–50	51–55	56–60 и т.д.
Кол-во р/э птиц	95	50	30
%	54,3	28,6	17,1
	Всего обнаружено 175 р/э = 100%		

Такая таблица должна быть различна для разного типа птиц. Если не подразделять птиц по типам, то общую оценку вероятности можно сделать этим способом.

Однако, нужно вводить коэффициент, учитывающий увеличение объёма облучения при переходе с дальности 45 км (дальность 100% обнаружения всех птиц в нашем примере) на дальность 50, 60 км и т.д.

В тех случаях, когда радиолокатор должен в оперативном режиме времени для целей авиации давать информацию о точном расположении птиц во времени и в пространстве следует рассчитывать два вида орнитологических карт, в том числе:

– карту фактического расположения векторов радиоэхо;

– карту расчётную вероятностного расположения радиоэхо с учётом вышеприведенных рассуждений.

На основе выполненных в нашем эксперименте оценок по приведенному способу (Dinevich L., Leshem Y., 2007) можно говорить о следующих результатах.

На уровне вероятности примерно 80%, те виды ночных мигрантов, которые летят через Израиль, радиолокатор МРЛ-5 обнаруживает в радиусе до 30 км.

На удалении до 40 км можно обнаружить не менее 35–52% этих мигрантов.

На большем расстоянии вероятность обнаружения птиц существенно уменьшается.

Следует заметить, что в ряде случаев, при пролётах в ночное время более крупных мигрантов высокая вероятность их обнаружения сохранятся и до 40 км.

В отличие от ночных перелётов дневные мигранты в Израиле чаще всего летят ориентированными параллельно береговой линии полосами. Осенью и весной направления движения птиц в этих полосах меняются почти на противоположные. В дневное время летят птицы, как правило, по размерам большие, чем ночью (аисты, пеликаны, орлы, обыкновенные осоеды и т.д.). При перелётах они активно используют конвективные потоки в атмосфере, которые формируются за счёт неоднородностей подстилающей поверхности, горно-долинными и бризовыми факторами. Отражаемость (в dBZ) дневных мигрантов значительно выше, чем более мелких ночных птиц. Нередко длина таких полос достигает 100–120 км. Анализ данных наблюдений, проведенных в дневное время суток, показал, что МРЛ-5 обнаруживает не менее 80% мигрантов на удалении до 30 км, то есть это близко к ночному обнаружению птиц. Не менее 60% дневных мигрантов он видит на удалении до 60 км, что существенно превышает дальность обнаружения птиц в ночное время суток. Эти данные можно использовать при принятии оперативных решений в управлении движением самолётов. В краткосрочном прогнозировании орнитологической обстановки можно, зная направления и скорости полёта птиц, статистические данные поведенческих ситуаций, строить вероятностные карты для больших радиусов (80 и 100 км).

Можно оценивать обнаружение птиц с помощью МРЛ, используя уравнение радиолокации точечной цели:

$$P_r = \frac{1{,}46 \cdot P_t \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4\pi)^3 L \cdot R^4}, \qquad (1)$$

где σ – эффективная площадь рассеяния (ЭПР) цели, λ – длина волны, P_t – импульсная мощность излучения; G – усиление антенны, L (дБ) – затухание в приемо-передающем тракте (в 2 направлениях); R – расстояние до цели.

С учетом размерностей параметров МРЛ соотношение (1) примет вид:

$$P_r\,[\text{Вт}] = \frac{7{,}4 \cdot 10^{-13} \cdot P_t\,[\text{кВт}] \cdot G^2 \cdot \lambda^2\,[\text{м}] \cdot \sigma\,[\text{м}^2]}{R^4\,[\text{км}] \cdot L}, \qquad (2)$$

где $7{,}4 \cdot 10^{-13}$ – коэффициент, учитывающий отношение $1{,}46/(4\pi)^3$.

ЭПР цели определяется следующим образом:

$$\sigma\,[\text{м}^2] \frac{P_{r\text{мин}}\,[\text{Вт}] \cdot 10^{0{,}1n} \cdot 10^{12} \cdot R^4\,[\text{км}]}{1{,}46 \cdot P_t\,[\text{кВт}] \cdot 10^3 \cdot G^2 \cdot \lambda^2\,[\text{м}] \cdot \eta_{\text{пер}} \cdot \eta_{\text{пр}}}, \qquad (3)$$

где $\eta_{\text{пер}}$ и $\eta_{\text{пр}}$ – величина коэффициента полезного действия (КПД) передающего и приёмного трактов РЛС соответственно, которые мы всегда принимали равными единице.

Из уравнения (3) можно получить для МРЛ-5 с учетом его параметров (мы подставили параметры своего МРЛ-5) зависимость вида $\sigma_{\text{мин}}$ [м^2] = φ (R [км]). Эта зависимость позволяет оценить, какая должна быть минимальная величина ЭПР ($\sigma_{\text{мин}}$) цели – птицы для того, чтобы МРЛ-5 обнаружил эту цель на данном конкретном расстоянии – R.

Для МРЛ-5
– на $\lambda_1 = 3{,}14$ см $\rightarrow \sigma_{мин}$ [м^2] $= 2{,}0\cdot10^{-10}$ R^4 [км]$10^{0{,}1n}$, (4)
– на $\lambda_2 = 10{,}15$ см $\rightarrow \sigma_{мин}$ [м^2] $= 1{,}3\cdot10^{-10}$ R^4 [км]$10^{0{,}1n}$.

Здесь множитель $10^{0{,}1n}$ учитывает превышение полезного сигнала над собственными шумами приемника. Если это превышение составляет n (дБ), например,

n = 7дБ, то $10^{0{,}1n} = 10^{0{,}1x7}=10^{0{,}7} = 5{,}01$.

В этом случае ЭПР птицы на $\lambda_1 = 3{,}14$ см будет равна

$$\sigma[м^2] = 2{,}0\cdot10^{-10}\,R^4\,[км]\cdot5{,}01.$$

Например, максимальное расстояние, на котором мы обнаруживаем птиц со значением $\sigma[м^2] = 2{,}0\times10^{-10}\,R^4$ [км]×5,01, когда в приемный тракт не введено затухание (то есть $10^{0{,}1n}=10^{0{,}1x0}=10^0 = 1$), равно 45 км.

Для МРЛ-5 на

$\lambda_1 = 3{,}14$ см $\sigma_{мин}$ [м^2] $= 2{,}0\cdot10^{-10}\,R^4\,10^{0{,}1n}$,

где ЭПР ($\sigma_{мин}$) есть то минимальное значение, которое необходимо для обнаружения птицы на различных расстояниях.

При R = 45 км ($R^4 = 45^4 = 4{,}1x10^6$).

Таким образом, на R = 45 км МРЛ-5 на $\lambda_1 = 3{,}14$ см обнаруживает птиц, если

$\sigma_{мин} = 2{,}0\cdot10^{-10}R^4 = 2{,}0\cdot10^{-10}\cdot4{,}1\cdot10^6 = 8{,}2\cdot10^{-4}$м^2.

То есть если на экране МРЛ мы чуть-чуть прослеживаем радиоэхо птицы, то её ЭПР в этом случае приблизительно равна $8{,}2\times10^{-4}$м^2.

Так, на разных расстояниях, даже не вводя затухание в приемный тракт, можно оценивать ЭПР птиц.

При $\sigma_{мин} < 8{,}2\cdot10^{-4}$ м^2 на R = 45 км МРЛ-5 птиц не обнаружит.

Если на R = 45 км мы обнаружили птиц и они исчезают на экране при введении в приемный тракт, например, 12 дБ,

что соответствует $10^{0{,}1n} = 10^{1{,}2} = 1{,}58\cdot10^1$, тогда на этом расстоянии

$\sigma_{мин} = 8{,}2\cdot10^{-4}\cdot1{,}58\cdot10^1 = 12{,}9\ 10^{-3} = !{,}3\cdot10^{-2}$ м^2,

то есть ЭПР птицы не менее $1{,}3\cdot10^{-2}$ м^2.

Если принять форму птицы, как эллипсоид вращения, то две поляризационные компоненты ΔPx и dP позволят вычислить отношением осей a/b (см. параграф 2 настоящей статьи). Зная ЭПР (σ) и соотношение осей птицы можно определить её размер и вид.

Некоторые соображения относительно получения и применения поляризационных характеристик отражённых сигналов для повышения точности селекции радиоэхо птиц

По расчётным и экспериментальным оценкам (Dinevich L., 1981; Chernikov A., Schupjatsky A., 1967) для вычисления деполяризационных характеристик и дифференциальной поляризации радиоэхо цели следует ортогональные характеристики отражённых сигналов осреднять не менее чем по 32 импульсам.

МРЛ-5 излучает 500 импульсов в секунду. Ширина диаграммы на $\lambda_1 = 3{,}14$ см равна 0,5 градуса, для $\lambda_2 = 10$ см равна 1,5 градуса.

Исходя из этого, для получения числа отражённых импульсов не менее 32 следует установить скорость вращения антенны не более одного оборота в минуту. При этой скорости антенна радиолокатора будет проходить сектор, равный одному градусу за 60 секунд / $360^0 \approx 0{,}14$ секунды.

В этом случае в каждом секторе (для обеих длин волн) передатчик успеет принять не менее чем 70 импульсов, т.е. по 35 импульсов и для горизонтальной, и для вертикальной составляющих сигнала. При этом для диаграммы 1,5 градуса ($\lambda_2 = 10$ см) количество импульсов будет в полтора раза больше.

Если собирать для оценки орнитологической обстановки данные с 5 уровней (к примеру для диаграммы 1,5 градуса установить вертикальные углы антенны 0^0, $0{,}5^0$, $1{,}0^0$, $1{,}5^0$, 2.5^0, $3{,}5^0$, $4{,}5^0$, $5{,}5^0$), то время сбора данных составит 8 минут, т.е. 480 секунд.

Для получения данных с такого количества уровней, с применением ныне действующего алгоритма, необходимо затратить при скорости 6 оборотов в минуту, т.е. 10 секунд на один оборот × 8 оборотов × 8 уровней = 640 секунд (более 10 минут). Ожидаемая точность селекции радиоэхо при применении поляризационных характеристик выше, чем при используемом алгоритме. Однако этот способ не даёт возможности построить вектора движения. Следует использовать оба способа селекции. На основе векторных орнитологических карт можно ориентироваться в динамике движения птиц, а на основе поляризационного способа оценивать точное размещение птиц в пространстве. При этом, рассчитывая значения σ каждого радиоэхо, можно оценивать размеры птиц и их виды (см. предыдущий параграф).

Выводы

Приведенные рассуждения показывают возможность повышения точности селекции радиоэхо птиц за счёт дополнения к разработанному в Израиле алгоритму новых признаков. Для реализации этих возможностей необходимо применить специ-

альную аппаратуру, позволяющую излучать поимпульсно электромагнитную энергию в вертикальной и горизонтальной плоскостях и аналогичным образом принимать их ортогональные компоненты. Развязка этих каналов должна быть не хуже, чем 28 dB. Такая развязка была достигнута в аппаратуре, которую автор использовал при разработке метода обнаружения града в облаках (Dinevich L., 1981). Применение последовательно один за другим обоих методов позволит не только повысить точность селекции радиоэхо птиц, оценивать их размеры и виды, но и строить векторную орнитологическую карту по различным уровням и в целом в заданном объёмном пространстве в радиусе не менее 60 км днём и 40 км ночью.

В итоге метод позволит получать несколько видов орнитологических карт, в том числе:

– орнитологические карты векторного распределения птиц по площади, разным высотным уровням и в формате 3d;

– те же вероятностные орнитологические карты векторного распределения птиц с интерполяцией на большие удаления от радиолокатора;

– орнитологические карты, освобождённые от ложных сигналов с расчётными значениями ЭПР (σ), а следовательно, с оценками размеров и видов птиц.

Благодарности

Автор искренне благодарит своего коллегу и соавтора в развитии темы радиолокации птиц, соавтора основных научных публикаций по этой теме проф. Иоси Лешема, а также руководство Тель-Авивского университета и Общества Охраны Природы Израиля за предоставленную возможность трудиться над данным исследованием.

Список литературы

1. Ganja I., Zubkov M., Kotjazi M. Radar ornithology, Stiinza, 1991. – P. 123–145.

2. Chernikov A. Radar clear sky echoes. Leningrad, Hydrometeoizdat, 1979. – P. 3–40.

3. Chernikov A., Schupjatsky A. Polarization characteristics of radar clear sky echoes. Transactions of USSR academy of sciences, atmosphere and ocean physics, 1967. – V.3, № 2. – P. 136–143.

4. Dinevich L. Certain Features of The Structure and Evolution of Hail Producing Cumulonimbus Clouds. J. Meteorological and Hydrological, 1981. – P. 41–49.

5. Dinevich L., Kapitalchuk I., Schupjatsky A. Measurement of the microphisical characteristics of clouds and precipitation with a dual – polarization radar. In: Artificial modification of atmospheric processes in Moldova, iss2, Kiscineu. – 1990.

6. Dinevich L., Kapitalchuk I., Schupjatsky A. Use of the polarization selection of radar signals for remote sounding of clouds and precipitation. 34 th Israel Annual conference on Aerospace science, 1994. – P. 273–277.

7. Dinevich L., Kaplan L. On radar observation of birds migrations. J. Scientific Israel – Technological Advantages. – 1999. – Vol. 4.

8. Dinevich L., Leshem Y., Sikora O. 2001. Radar observations analysis of season bird migration in israel at night (Based on data of radar photo registration obtained in 1998-2000), J. Scientific Israel – Technological Advantages. – 2001. – Vol. 3, № 1–2.

9. Dinevich L., Leshem Y., 2007. Algorithmic System for Identifying Bird Radio-Echo and Plotting Radar Ornithological Charts. Journal The Ring № 1–2, Vol. 29, P. 3–39, Poland. ISSN 0035-5429.

10. Dinevich L., Leshem Y., 2008. Identification of migrating birds' echo and plotting ornithological charts based on MRL-5 radar data. Journal «Advanced Contemporary Radioelectronics» № 3. – P. 48–68, The Institute for Radio Engineering and Radioelectronics, Russian Academy of Sience, Moscow. ISSN 0373-2428.

11. Dinevich L., Radar Monitoring of Bird Migration. Tel Aviv University. – 2009. – P. 172.

12. Литвинов И. Структура атмосферных осадков. – Л. Гидрометеоиздат, 1974.

13. Минервин В., Моргунов С., Шупяцкий А. Поляризационные исследования структуры кучево-дождевых облаков. Труды ЦАО. – 1971. – вып. 95.

14. Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5 (РД 52.04.320 -91), С-Пб, Гидрометеоиздат, 1993. – 357 с.

15. Shupijatcky A. Радиолокационное рассеяние несферическими частицами, Тр. ЦАО. – 1959. – вып. 30. – С. 39–52.