

Спектрально-поляриметрический метод зондирования природных сред

Ф. И. Яновский

Национальный авиационный университет, Киев, Украина, yanovsky@nau.edu.ua

Предложен новый метод дистанционного зондирования, который сочетает учет поляризационных и спектральных особенностей сигналов, полученных от удаленных объектов, путем спектрального анализа поляриметрических переменных. Теория детально разработана для случая наблюдений дождя, однако выполнено обобщение и для других объектов и представлены примеры применения спектрально-поляриметрического подхода в различных областях.

This paper introduces a new method of remote sensing that combines polarimetric and spectral features of signals received from distant objects, providing spectral analysis of polarimetric variables. The detailed theory is developed for the case rain observation, however generalization for other objects is made, and some examples of spectral polarimetric approach application in different fields are presented.

Введение.

Дистанционное зондирование как процесс получения информации об удаленных объектах без непосредственного физического контакта с ними получило широкое развитие. Оно включает исследование поверхности земли с летательных аппаратов, получение информации об атмосфере и объектах в ней, астрономические и астрофизические наблюдения и многое другое. В качестве носителя информации в дистанционном зондировании используются излучения, как правило, электромагнитной природы, включая свет. Иногда могут быть использованы также акустические колебания (например, в атмосфере или в водной среде) или радиоактивные излучения. В этой работе мы ограничиваемся лишь электромагнитным излучением.

Активные и пассивные методы дистанционного зондирования разработаны и применяются в широком диапазоне рабочих частот электромагнитных колебаний. Различные характеристики излучения используются в качестве информативных параметров. Спектральный анализ сигналов является, пожалуй, одной из наиболее востребованных процедур обработки сигналов с целью получения информации об объекте излучения. В активной радиолокации достаточно широкое применение находят поляризационные методы дистанционного зондирования.

Исследование поляризационных особенностей рассеяния электромагнитных волн СВЧ диапазона несферическими каплями воды фактически было начато в 50-е годы прошлого столетия. Период быстрого развития радиолокационной поляриметрии отмечается с середины 70-х годов до середины 80-х, когда были проанализированы потенциальные возможности оценки дифференциальной отражаемости Z_{DR} [1], а затем была проведена большая работа по разработке и исследованию различных направлений метеорологического применения радиолокационной поляриметрии. В дополнение к дифференциальной отражаемости были предложены и другие поляризационные параметры, такие как линейное деполяризационное отношение L_{DR} и удельная дифференциальная фаза K_{DP} , а позднее и коэффициент взаимной корреляции ρ_{HV} сигналов с ортогональной поляризацией. С тех пор в области радиолокационной поляриметрии и ее применения в метеорологии наблюдался медленный, но стабильный прогресс. В то время как первые поляризационные и поляриметрические методы были разработаны для некогерентных радиолокаторов, в настоящее время мы видим рост

активности в поляриметрических наблюдениях с использованием когерентных РЛС [2]. Появление когерентных поляриметрических средств наблюдений сопровождается быстрым ростом количества измеряемых параметров. Необходимо было исследовать взаимосвязи между различными доплеровскими и поляриметрическими параметрами и, возможно, найти новые измеряемые величины, характерные и подходящие для доплеровской поляриметрии. Это было выполнено и описано в [3], где были введены и исследованы новые измеряемые величины – спектральная дифференциальная отражаемость $sZ_{DR}(v)$ и спектральное линейное деполаризационное отношение $sL_{DR}(v)$, которые являются функциями доплеровской скорости (или частоты), а также другие доплеровско-поляриметрические параметры, например, дифференциальная доплеровская скорость – Differential Doppler Velocity (DDV) и наклон спектральной дифференциальной отражаемости $Slope\ sZ_{DR}$, сокращенно – SLP.

Параметр DDV (немного в другой формулировке) был предложен в [4] и исследован в качестве измеряемого параметра для оценки распределение капель по размерам. Идея представления дифференциальной отражаемости и удельной дифференциальной фазы в виде распределения по доплеровским частотам была предложена еще раньше в [5], хотя и без выполнения существенного анализа.

Таким образом, используя спектральный анализ, поляризационные параметры можно выразить как функции доплеровской частоты или, точнее, радиальной скорости. Такой доплеровско-поляриметрический подход к дистанционному зондированию позволяет получить информацию о скорости и форме рассеивателей в разрешающем объеме метеорологического объекта. Необходимые довольно подробные математические модели [6 - 8] были разработаны для облаков и осадков, в основном, для дождя. Этот подход был успешно использован для различных приложений [9 - 14].

В данной работе мы делаем попытку обобщения такого подхода на широкий класс задач дистанционного зондирования природных явлений и объектов. В общем случае частота в качестве аргумента спектра может отражать не только доплеровскую частоту или вообще радиальную скорость, но и очень разные физические свойства исследуемых объектов в зависимости от особенностей конкретной задачи в области дистанционного зондирования. Такое обобщение позволяет говорить о новом спектрально-поляризационном подходе или методе, который будет полезен для исследования удаленных объектов и природных явлений.

Формулировка задачи спектральной поляриметрии.

Предположим, что существует объект реального мира, некоторые аспекты которого мы хотели бы исследовать. Та часть объекта реального мира, которая представляет те аспекты, которые интересны для нас, является объектом исследования. Под исследованием подразумевается, грубо говоря, построение некоторых математических моделей, которые могут улучшить наше понимание объекта исследования, позволяют делать прогнозы о его будущем состоянии или поведении, и возможно, предоставить в общем случае информацию о том, как контролировать, ту часть реального мира, которая является объектом нашего исследования. Исследование (как процесс) может быть реализовано путем сбора данных, введения этих данных в математическую модель, анализа модели для управления процедурой сбора данных, включая проведение экспериментов в системе, если это возможно.

Задача значительно усложняется, если объект является удаленным, недоступным для прямого физического контакта, так же, как и для контролируемого изменения его состояния. Тем не менее, для конкретных объектов и ситуаций имеется возможность построения феноменологической модели, позволяющей рассчитывать информативные параметры, которые можно с некоторой точностью оценивать по результатам экспериментальных наблюдений.

Сконцентрируемся на поляриметрических информативных параметрах, которые, как известно, несут информацию о характере формирования электромагнитного сигнала, например, о форме и пространственной ориентации объекта, или рассеивателя в случае активной радиолокации. С другой стороны, если принимаемый сигнал не является монохроматическим, что практически выполняется всегда, то можно анализировать распределение величины поляриметрического параметра по частотным составляющим, то есть, спектральную плотность поляриметрического параметра.

Это приводит к понятию спектральных поляризационных (поляриметрических) характеристик. В то время как поляризационный параметр интегрально характеризует свойства разрешающего объема исследуемого объекта, спектральная поляриметрическая характеристика, которая является функцией частоты, дает представление о тонкой структуре объекта внутри разрешающего объема. В случае объемно-распределенного объекта (например, дождь), это связано с особенностями рассеивателей (форма, движение, размер, диэлектрические свойства) в пределах разрешающего объема.

По сути, описанный подход обеспечивает некий вариант сверхразрешения, когда появляется возможность различения объектов внутри разрешающего объема по частотному признаку, хотя и без точного указания местоположения их в этом объеме.

Физическая интерпретация результатов спектрально-поляриметрического анализа должна зависеть от характера исследуемого объекта и сущности решаемой задачи. Частный случай, когда разрешающий объем заполнен рассеивателями несферической (в общем случае) формы, которые могут двигаться с разными скоростями, ведет к доплеровской поляриметрии. В этом случае физический смысл аргумента спектральной плотности поляриметрического параметра есть доплеровская частота, связанная с радиальной скоростью рассеивателя соответствующей формы и ориентации.

Доплеровская поляриметрия.

В рамках указанной постановки доплеровская поляриметрия является просто частным случаем спектральной поляриметрии. Однако именно она в настоящее время быстро развивается в области дистанционного зондирования атмосферы. Поэтому целесообразно рассмотреть этот частный случай более подробно.

ДОПЛЕРОВСКИЙ ПОДХОД. Оценивая доплеровский сдвиг частоты, доплеровский радиолокатор может измерять важные характеристики скорости цели, однако радиальная скорость зависит от ряда факторов, которые нелегко разделить и, кроме того, при зондировании объемно распределенной цели в разрешающем объеме имеется множество рассеивателей. Поэтому в реальности мы имеем дело с доплеровским спектром $S^{(*)}$, который представляет собой спектр мощности комплексного сигнала, выраженный как функция доплеровской частоты f или скорости v . Если в качестве аргумента спектра использована скорость, то $S(v)$ интерпретируется как взвешенное на отражающую способность распределение радиальных скоростей рассеивателей, находящихся в разрешающем объеме. Таким образом, $S(v)dv$ выражает принятую мощность отраженного

сигнала, сформированную рассеивателями, которые имеют скорости в интервале dv . В случае такого определения доплеровский спектр $S(v)$ должен быть нормирован в соответствии со следующим выражением:

$$\int_{-\infty}^{\infty} S(v)dv = \bar{P}_{Rx}, \quad (1)$$

где \bar{P}_{Rx} - средняя мощность принятого сигнала.

В качестве примера объемно распределенной цели рассмотрим дождь. Тогда данное выше определение доплеровского спектра приводит к следующей его модели:

$$S_v(v) = \xi \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} p_p(v/D)\sigma(D)N(D)dD, \quad (2)$$

где $N(D)$ - распределение капель по размерам,

$p_p(v/D)$ - плотность вероятности радиальной скорости капли при условии, что ее эквивалентный диаметр D ,

$\sigma(D)$ - эффективная отражающая площадь капли с эквивалентным диаметром D ,

ξ - коэффициент нормировки в соответствии с выражением (1).

Эта модель полезна для интерпретации оценок спектра $\hat{S}_v(v)$, полученных по результатам измерений на основе преобразования Фурье принятого сигнала.

В практике радиолокационной метеорологии обычно используются только три параметра доплеровского спектра: нулевой момент (средняя мощность или отражаемость), первый начальный момент (средняя доплеровская скорость) и второй центральный момент (дисперсия доплеровской скорости) [15], хотя известно много научно-исследовательских работ, например, [12, 16, 17], описывающих более полное применение доплеровского спектра.

Основные проблемы, ограничивающие точность и достоверность получаемой информации при использовании доплеровского подхода, связаны со следующими факторами:

- влияние скорости носителя радиолокационного средства и сканирования луча антенны;
- расширение ширины спектра из-за ограниченной (не бесконечно узкой) ширины луча антенны;
- влияние формы зондирующего сигнала и диаграммы направленности антенны;
- влияние ветра;
- неоднозначность измерения скорости из-за модуляции зондирующего сигнала;
- инерционность рассеивателей при оценке параметров турбулентности [23].

По данным доплеровских измерений практически невозможно получить информацию о форме рассеивателей; можно сказать более осторожно, что в доплеровском спектре содержится очень мало информации о форме рассеивателей.

ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИЙ ПОДХОД.

С учетом поляризации отражающие свойства радиолокационной цели можно полностью описать с помощью восьми чисел, которые составляют матрицу рассеяния (в линейном поляризационном базисе):

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где величины s_{xy} , $x = H;V$, $y = H;V$ в общем случае являются комплексными с модулями S_{xy} и аргументами ψ_{xy} .

В выражении (3) индексы означают поляризацию принимаемой составляющей рассеянного целею сигнала (первый индекс) и поляризацию зондирующей волны (второй индекс), например, H – горизонтальная и V – вертикальная. В общем случае может быть использован любой ортогональный поляризационный базис.

Матрица рассеяния является индивидуальной для каждого объекта или класса объектов и представляет собой некий «портрет» цели. Идеальные отражатели создают сигнал обратного рассеяния таким образом, что падающая волна с H поляризацией остается H , и падающая волна с V поляризацией остается V , но отраженные волны сдвигаются по фазе на 180° .

В действительности измерять абсолютные значения амплитуд и фаз довольно трудно. Поэтому часто используют относительные измеряемые величины, например, такие величины, как S_{HH}/S_{VV} , S_{HV}/S_{VH} или $\psi_{HH} - \psi_{VV}$. Например, типичной поляриметрической измеряемой переменной является дифференциальная отражаемость, которая определяется как

$$Z_{DR} = 10 \lg \frac{|S_{HH}|^2}{|S_{VV}|^2} = 10 \lg \frac{S_{HH}^2}{S_{VV}^2} = 10 \lg \frac{\bar{P}_{RxHH}}{\bar{P}_{RxVV}} = 10 \lg \frac{\hat{Z}_{HH}}{\hat{Z}_{VV}}, \quad (4)$$

где \hat{Z}_{HH} , \hat{Z}_{VV} – оценки радиолокационной отражаемости, которые пропорциональны средней мощности отраженного (принятого) сигнала \bar{P}_{Rx} , при горизонтальной и вертикальной поляризациях соответственно; с другой стороны, радиолокационная отражаемость определяется микроструктурой отражающего объема, заполненного каплями, и при условии сферических капель диаметром D , $D_{\min} \leq D \leq D_{\max}$ по

определению равна $Z = \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} D^6 N(D) dD$.

Параметр Z_{DR} (4) связан с формой и ориентацией рассеивателей. В случае сферических рассеивателей $Z_{DR}=0$ независимо от их ориентации в пространстве.

Много других важных поляриметрических переменных известны и используются [12]. Поляриметрический подход привлекателен тем, что он связан с относительными измерениями и приводит к многопараметрическим системам. Поляриметрические параметры очень чувствительны к форме и ориентации рассеивателей. С другой стороны они не дают никакой информации о скорости цели. Поляриметрический подход может быть реализован на основе некогерентного радиолокатора. Однако в настоящее время применение когерентных радиолокаторов с двойной поляризацией стало обычным, кроме того, известно много экспериментальных разработок метеорологических радиолокаторов, способных генерировать и принимать сигналы практически любой заданной поляризации, так называемых «fully polarimetric» радиолокаторов [23], [24]. Вопрос в том, как лучше использовать преимущества таких радиолокаторов.

ДОПЛЕРОВСКО-ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИЙ ПОДХОД.

Оперативные доплеровские метеорологические радиолокаторы с поляризационным разнообразием, чаще всего, просто с двойной поляризацией, как правило, могут обеспечить пользователей стандартной доплеровской и поляриметрической информацией в различных режимах. В отличие от этого, доплеровская (спектральная) поляриметрия пытается ответить на новый интересный вопрос о поведении поляризационных параметров в случае отражения от рассеивателей, которые находятся в разрешающем объеме, но движутся с разными скоростями.

Например, в радиолокационной системе с линейной ортогональной поляризацией, вместо дифференциальной отражаемости (4) в работах [2, 4] используется следующая функция:

$$sZ_{DR}(f) = 10 \log \frac{S_{HH}(f)}{S_{VV}(f)}, \quad (5)$$

которая сперва была названа удельной дифференциальной отражаемостью [1] (в смысле дифференциальная отражаемость на единицу частоты или доплеровской скорости), но позже – спектральной дифференциальной отражаемостью [4]. Ее можно также назвать спектральной плотностью дифференциальной отражаемости [13].

Значительное улучшение качества и количества сведений о микроструктуре осадков и динамических процессах в них может быть достигнуто за счет совместной обработки доплеровской и поляриметрической информации. Два энергетических доплеровских спектра, HH и VV целесообразно измерять одновременно с целью получения доплеровского спектра дифференциальной отражаемости Z_{DR} как функции скорости, то есть $sZ_{DR}(v)$. Таким образом, спектральная дифференциальная отражаемость определяется для каждой доплеровской скорости.

В последнее время несколько других доплеровско-поляриметрических функций и параметров были предложены и исследованы. Среди них, например, спектральная дифференциальная фаза (или спектральная плотность дифференциальной фазы) [2, 10, 14], спектральное линейное деполяризационное отношение [1, 15], спектральная ковариационная матрица [16], спектральная плотность коэффициента взаимной корреляции отраженных сигналов на ортогональных поляризациях [10], дифференциальная доплеровская скорость [5, 17] и др.

В ряде исследований было показано, что спектральный поляриметрический подход может быть использован для получения довольно детальной информации о зоне осадков и слое таяния [2]. Он дает возможность оценки интенсивности турбулентности [4], определения микроструктуры дождя [5, 17, 18], получения данных о ветре и различения отражений от птиц и насекомых [13], а также для распознавания типа гидрометеоров [19].

Основные работы, выполненные в этой области, основаны на применении микроволновой радиолокационной техники (S-диапазон, C-диапазон, X-диапазон, а иногда даже миллиметровый диапазон длин волн).

Подробная теория была разработана относительно доплеровского поляриметрического зондирования дождя [7]. Тем не менее, успешные экспериментальные работы известны для различных задач дистанционного зондирования атмосферы.

Обобщение спектрального поляриметрического подхода.

В этом разделе мы попытаемся показать, что спектральный поляриметрический подход является более общим, чем рассмотренное выше применение микроволнового доплеровско-поляриметрического радиолокационного зондирования атмосферы.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБОБЩЕНИЯ. Степень общности спектрально-поляризационного подхода, целесообразно обсудить, опираясь на следующие характеристики:

- объекты исследования;
- методы дистанционного зондирования;
- диапазон рабочих частот;
- физический смысл (интерпретация) частоты как аргумента спектра;
- области применения.

РАЗНООБРАЗИЕ ОБЪЕКТОВ НАБЛЮДЕНИЯ.

Прежде всего, отметим, что логично распространить этот подход не только на другие метеорологические объекты, но и на любые объекты наблюдения. Строго говоря, задачи распознавания объектов в атмосфере, в частности рассмотренное выше различие между насекомыми и птицами [10], которые на самом деле не являются метеорологическими объектами, подтверждают, что такой подход является эффективным для обнаружения любых объектов, имеющих сложную форму и движущихся с различными скоростями. Нет никаких сомнений, что спектральная поляриметрия применима также и к искусственным объектам.

РАЗЛИЧНЫЕ МЕТОДЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ.

Доплеровско-поляриметрический метеорологический радиолокатор использует активный метод зондирования (первичный радиолокатор). Однако спектральная поляриметрия может быть применена не только в активных, но также и в полуактивных и, возможно, пассивных системах дистанционного зондирования. Полуактивной мы называем систему, которая принимает сигнал, рассеянный объектом наблюдения, который освещается внешним источником искусственного излучения, изначально разработанным и используемым с совершенно другими целями. Пассивные системы используют излучение самого объекта наблюдения, включая рассеянное излучение внешних источников естественного происхождения. Пример пассивного спектрально-поляриметрического дистанционного зондирования в астрофизике рассмотрен ниже (в последнем подразделе).

РАЗНООБРАЗИЕ ПРИМЕНИМЫХ ДИАПАЗОНОВ ЧАСТОТ.

Для спектральной поляриметрии существенно, чтобы носитель информации характеризовался способностью к поляризации волн. Поэтому, очевидно, что в принципе могут использоваться электромагнитные волны любых частотных диапазонов, включая инфракрасный, видимый свет, и ультрафиолетовое излучение.

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ АРГУМЕНТА СПЕКТРА.

Особенно интересно и важно отметить, что спектральные частоты могут не только соответствовать радиальным скоростям рассеивателей, как это имеет место в доплеровской поляриметрии, но они могут характеризовать совершенно другие свойства объекта исследования. Один из очевидных примеров – применение спектрального анализа, для исследования химического состава веществ. Если поляризованное электромагнитное излучение распространяется в некой среде, т.е. веществе, например, представляющем собой композицию газов, то спектр этого излучения на выходе из среды будет содержать частотные компоненты, которые характерны для веществ, составляющих среду распространения. Поэтому, физический смысл спектральных частот в общем случае может

быть различным, а не связанным только со скоростями рассеивателей. Таким образом, интерпретация результатов анализа зависит от особенностей конкретной задачи дистанционного зондирования.

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ.

Спектрально-поляриметрический подход может применяться в различных областях дистанционного зондирования. Даже если основываться лишь на результатах применения доплеровско-поляриметрической радиолокации, можно утверждать, что эти результаты важны для авиации [24, 25], метеорологии [26], климатологии, гидрологии и сельского хозяйства. Они полезны также для телекоммуникационных систем, радионавигации и радиолокации, поскольку позволяют диагностировать состояние атмосферы, условия распространения радиоволн и обнаружения радиолокационных целей на фоне облаков и осадков. Астрономия и астрофизика [27] могут быть отдельной интересной областью спектрально-поляриметрического применения метода.

Явление, известное как «свечение планет» (planetshine), происходит, когда свет звезды, например, солнечный свет, отраженный от планеты освещает ночную сторону одного из ее спутников. Как правило, это приводит к тому, что ночная поверхность спутника освещается мягким, слабым светом.

Самый очевидный пример этого астрономического явления – «свечение Земли» (earthshine), которое может быть видно с Земли, когда Луна видна в виде тонкого полумесяца и одновременно слегка заметен ее полный диск. Это вызвано тем, что Луна освещена не только непосредственно светом Солнца, но также и светом, отраженным от Земли, который слабо освещает темную сторону Луны.

Связанная с этим явлением статья, недавно опубликованная в журнале «Nature» [29], показывает возможность использования спектральной поляриметрии в астрофизике для поиска жизни во вселенной. С этой целью представлены и проанализированы результаты наблюдения Луны 27 октября 2011 в Обсерватории ESO Paranal в Чили. Основным источником света в солнечной системе – Солнце. В результате отражения от Земли спектр света существенно изменяется. Кроме того, отраженный свет оказывается сильно поляризованным в отличие от исходного света Солнца. В то же время характеристики Земли, ее атмосферы и биосферы относительно хорошо известны или, по крайней мере, доступны для изучения. Наблюдая earthshine, астрономы могут изучать свойства света, отраженного от Земли, для поиска признаков жизни, используя Землю как модель планеты не из Солнечной системы и обрабатывая признаки жизнедеятельности биологических объектов и методики поиска жизни на других отдаленных планетах.

Оказалось, что изучение особенностей поляризации света и его спектра, то есть, интенсивности различных частотных составляющих, позволяет разработать довольно чувствительные тесты на присутствие жизни. В частности, в атмосфере планеты основными газами, являющимися производными биологических процессов, являются кислород, озон, метан и углекислый газ. Однако каждый из них может быть выработан в атмосфере планеты естественным образом и без присутствия жизни. Надежным признаком наличия биологической деятельности является одновременное присутствие этих газов в определенных количествах, которые совместимы только с присутствием жизни [29]. Если бы жизнь (прежде всего, растительная) внезапно исчезла, и прекратился процесс непрерывного пополнения этих газов, произошли бы соответствующие реакции и рекомбинация этих газов. Часть из них быстро исчезла бы, и характерные признаки жизни исчезли вместе с ними. Дистанционное исследование особенностей спектра поляризованных электромагнитных колебаний (света) открывает возможности поиска

признаков жизни во вселенной. Этот интересный пример показывает довольно высокий уровень обобщения спектрально-поляриметрического метода.

Выводы.

Предложен новый обобщенный метод дистанционного зондирования, который сочетает спектральные и поляризационные особенности сигналов, принятых от удаленных объектов. Показано, что путем выполнения спектрального анализа поляриметрических измеряемых переменных (параметров) можно получать различную информацию о свойствах объектов и явлений. Подробная теория и математические модели разработаны для случая наблюдений дождя, однако сделаны обобщения для других объектов и приведены некоторые примеры применения спектрально-поляриметрического подхода в различных областях.

Благодарности.

Автор благодарит своих коллег из Делфтского технологического университета (Нидерланды), в частности Германа Рушенберга, Кристин Уналь, Олега Краснова и Лео Лигхарта за плодотворное сотрудничество в доплеровско- поляриметрических радиолокационных исследованиях атмосферы в 1996-2003 гг., а также Душана Зрнича из Национальной лаборатории сильных штормов – NSSL NOAA, Норман, Оклахома (США) за очень полезные обсуждения в 2005 и 2008 годах.

Литература

1. T. A. Seliga and V. N. Bringi, "Potential use of radar differential reflectivity measurements at orthogonal polarizations for measuring precipitation", *J. Appl. Meteorol.* 15, pp. 69–76, 1976.
2. V.N. Bringi and V. Chandrasekar, *Polarimetric Doppler weather radar, principles and applications*, Cambridge University Press, 636 pp., 2001.
3. F. J. Yanovsky, Model of the relationship between Doppler and polarization parameters of the radar signal from precipitation. Report No IRCTR-S-002-98. TU-Delft, Netherlands, 108 pp., 1998.
4. R. Wilson, A.J. Illingworth, and T.M. Blackman, "Differential Doppler velocity: a radar parameter for characterizing hydrometeor size distributions", *J. Appl. Meteorology*, 36, 649–663, 1997.
5. V. Kezys, E. Torlaschi, and S. Haykin, "Potential capabilities of coherent dual polarization X-band radar", *Proc. 26th Int. Conf. on Radar Meteorology*, Norman, OK, 106–108, 1993.
6. F.J. Yanovsky, "Phenomenological Models of Doppler-polarimetric microwave remote sensing of clouds and precipitation", *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'02*, Toronto, Canada, 2002, Vol. 3, pp. 1905 -1907, 2002.
7. D. N. Glushko, F. J. Yanovsky, "Analysis of differential Doppler velocity for remote sensing of clouds and precipitation with dual-polarization S-band radar", *International Journal of Microwave and Wireless Technologies (Cambridge University Press)*, Vol. 2, issue 3-4, pp. 391-398, 2010.
8. F. Yanovsky, "Inferring microstructure and turbulence properties in rain through observations and simulations of signal spectra measured with Doppler–polarimetric radars", *Book Chapter in: Polarimetric Detection, Characterization, and Remote Sensing // M.I. Mishchenko et al. (eds.), Springer*, pp. 501-545, 2011.

9. C. M. H. Unal, D. N. Moisseev, F. J. Yanovsky, H. W. J. Russchenberg, "Radar Doppler polarimetry applied to precipitation measurements: Introduction of the spectral differential reflectivity", 30-th Conf. Radar Meteorol. AMS, Boston, 316-318, 2001.
10. F. J. Yanovsky and L. P. Ligthart, "Microwave remote sensing of dangerous meteorological phenomena". In Proceedings of the XIII International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications, Vol. 3, pp. 70–82., 2000.
11. F.J. Yanovsky, H.W.J. Russchenberg, and C.M.H. Unal, "Retrieval of information about turbulence in rain by using Doppler-polarimetric radar", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Feb., Vol. 53, No 2, pp. 444 – 450, 2005.
12. S. Bachmann, D. Zrnica, "Spectral density of polarimetric variables separating biological scatterers in the VAD display", J. Atmos. Oceanic Technol., 24, 1186–1198, 2007.
13. W. Yadong, X. Xiao, and T.-Y. Yu, "Spectral analysis of dual-polarization radar signals in a tornadic supercell storm". In Proceedings of the 24th Conference on Severe Local Storms (Savannah, GA), pp. 1–10., 2008.
14. F. J. Yanovsky, Yu. A. Averyanova, "Meteorological applications of multiparameter polarimetric radar", European Radar Conference (EuRAD-2011), Manchester, UK, pp.1-4, 2011.
15. R. Doviak and D. Zrnica, Doppler radar and weather observations, Academic Press, 2nd edition, San Diego, CA, 562 pp., 1993.
16. D. S. Zrnica and R. J. Doviak, "Velocity spectra of vortices scanned with a pulsed-Doppler radar". J. Appl. Meteorol., 14, pp. 1531–1539, 1975.
17. F. Yanovsky, Y. Ostrovsky, V. Marchuk, "Algorithms for object recognition by weather radar", Proceedings International Radar Symposium IRS-2008, Wroclaw, Poland, pp. 241-244, 2008.
18. S. Bachmann, D. Zrnica, "Spectral polarimetric VAD separates bird from insect (wind) velocities", Proceedings of ERAD 2006, Fourth European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology, Barcelona, Spain, P2.3, p. 96 (4 pp.), 2006.
19. C. M. H. Unal, "Spectral polarimetric radar clutter suppression to enhance atmospheric echoes", Journal of Atmospheric and Oceanic Technology Vol. 26, pp. 1781-1797, 2009.
20. C. M. H. and D. N. Moisseev, "Combined Doppler and polarimetric radar measurements: Correction for spectrum aliasing and non simultaneous polarimetric measurements", J. Atmos. Oceanic Technol., 21, pp. 443–456, 2004.
21. H. W. J. Russchenberg, "Doppler polarimetric radar measurements of the gamma drop size distribution of rain", Journal of Applied Meteorology, Vol. 32, pp. 1815-1825, 1993.
22. Y. P. Ostrovsky, F. J. Yanovsky, H. Rohling, "Turbulence and precipitation classification based on Doppler-polarimetric radar data", Proceedings of the European Microwave Association, Vol. 3, Issue 1, pp. 57-61, 2007.
23. F. J. Yanovsky, "Simulation study of 10 GHz radar backscattering from clouds and solution of the inverse problem of atmospheric turbulence measurements", Computation in Electromagnetics, IEE No. 420, pp. 188-193, 1996.
24. F. J. Yanovsky, Doppler-Polarimetric Approach for Supercooled Water Detection in Clouds and Precipitation by Airborne Weather Radar. International Radar Symposium IRS 2004. Proceedings. Warsaw, Poland, pp. 93-100, 2004.
25. F. J. Yanovsky, "Polarimetric Technique for Aircraft Icing Alert Using Airborne Radar", Proceedings of the European Radar Conference EuRAD 2004, Amsterdam, pp. 33-36, 2004.
26. F. J. Yanovsky, C. M. H. Unal, H. W. J. Russchenberg, L. P. Ligthart. "Doppler-Polarimetric Weather Radar: Returns from Wide Spread Precipitation", Telecommunications and Radio Engineering, Volume 66, Issue 8, pp. 715-727, 2007.

27. M. I. Mishchenko, Y. S. Yatskiv, V. K. Rosenbush, G. Videen (eds.), *Polarimetric detection, characterization, and remote sensing*, Springer, 545 pp., 2011.
28. Yanovsky F. J., *Spectral-Polarimetric Method of Objects and Phenomena Observation*, Proceedings 5th World Congress “Aviation in the XXI Century”, Vol.2 Radar Methods and Systems Workshop (RMSW-2012), Kyiv, pp. 3.7.139-3.7.145, 2012.
29. M. F. Sterzik, S. Bagnulo, E. Palle et al, “Biosignatures as revealed by spectropolarimetry of Earthshine”, *Nature*, 483,pp. 64–66, March 2012.