

УДК 621.3.095.1

Н.Н. Бадулин, Ю.Б. Попов, Л.Н. Хлопотников

Применение аппарата фильтрации Калмана при оценке радиолокационным способом поляризационной анизотропии метеобразований

Обсуждаются вопросы синтеза алгоритма оценивания поляризационной анизотропии метеобразований. Рассмотрен алгоритм, основанный на теории фильтрации Калмана в предположении, что шумы измерений описываются законом распределения, отличным от нормального. Результаты представляют интерес для многих направлений радиолокационной метеорологии, таких как авиационная метеорология, прогнозирование чрезвычайных ситуаций, связанных с ливнями, грозами и градом, сельскохозяйственная метеорология и т.п.

Ключевые слова: поляризация, поляризационная анизотропия, оптимальная фильтрация.

В работах [1–2] для метеобразования, представленного совокупностью одинаковых по размерам несферических частиц воды, получены соотношения, связывающие уровень эхо-сигналов при различных поляризациях излучения радиолокатора с фактором формы частиц и их фазовым состоянием.

В работах [3–5] исследуется связь элементов матрицы рассеяния совокупности различных по размерам несферических частиц с параметрами спектра их размеров. Анализируется ситуация, характерная для реальных метеобразований, когда размер капли определяет степень отличия ее формы от сферической. Предлагаются методы экспериментальной оценки важнейшей характеристики метеобразования, как объекта радиолокационного зондирования – коэффициента анизотропии. Показано, что такая оценка может быть получена с помощью поляризационной манипуляции излучения импульсного радиолокатора.

Оценка коэффициента анизотропии или эквивалентного параметра – фактора формы (ФФ) определяется как отношение средних значений уровней отраженных метеобразованием сигналов различной поляризации. Например [3–5], для оценки фактора формы можно использовать комбинацию вертикально и горизонтально поляризованного излучения, а для оценки коэффициента анизотропии – комбинацию линейно поляризованного излучения и излучения, поляризованного по кругу.

Один из вариантов структурной схемы радиолокационного поляриметра такого типа приведен на рис. 1. Здесь основным элементом, определяющим текущую поляризацию излучаемого сигнала, является полуволновая фазовая пластина, конструктивно установленная в облучателе антенной системы. Периодическое переключение ориентации фазовой пластины с 0 на 45° относительно широкой стенки прямоугольного волновода приводит к изменению поляризации излученного сигнала с вертикальной на горизонтальную. При этом уровни принимаемого сигнала при вертикальной (E_V) и горизонтальной (E_H) поляризациях измеряются и запоминаются. Это позволяет, с учетом амплитудной калибровки приемного устройства и последующей оцифровки сигналов, получить на выходе регистратора величину

$$\lg E_V - \lg E_H = \lg \frac{E_V}{E_H}. \quad (1)$$

Эта величина однозначно связана с КА и ФФ рассеивающего объема, координаты которого определяются угловой ориентацией антенны и временным положением стробирующего импульса. При этом полагается, что рассеивающий объем за время измерений не претерпевает существенных изменений [3–5].

Поскольку измеряемым параметром является разность сигналов на выходе логарифмического приемника, определение абсолютных значений уровней сигналов не требуется.

Особенностью сигнала, отраженного метеобразованием, является то обстоятельство, что уровень этого сигнала флуктуирует. Эти флуктуации обусловлены взаимным перемещением частиц внутри рассеивающего объема. Информативными параметрами при оценке анизотропии рассеяния являются средние значения рассеянных сигналов при различных поляризациях зондирующего сигнала. Кроме того, рассеянный сигнал в приемном устройстве радиолокатора смешивается с собственными шумами приемника.

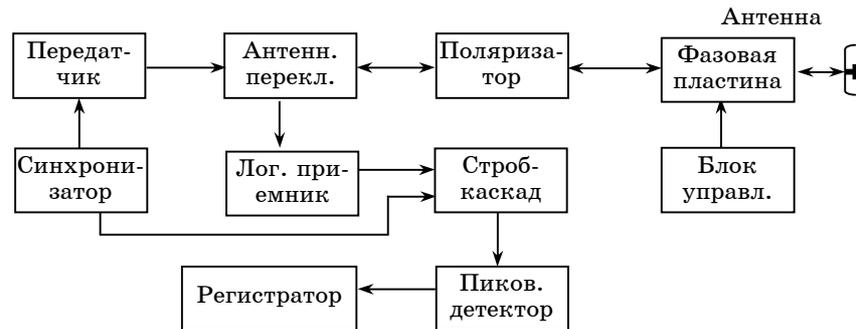


Рис. 1. Структурная схема метеорологического радиолокационного поляриметра

Таким образом, возникает задача синтеза алгоритма оптимальной фильтрации принимаемых сигналов на фоне флуктуационной составляющей рассеянного сигнала и собственных шумов приемника.

Если учесть то обстоятельство, что оценки фактора формы и коэффициента анизотропии формируются как разница средних значений принимаемых сигналов при различных поляризациях излучения, то речь идет о синтезе алгоритма оптимального оценивания этих параметров на фоне шумов различной природы. Такой алгоритм может быть синтезирован с использованием методики фильтрации Калмана (ФК) [6, 7].

Известно, что ФК позволяет получить оптимальную байесовскую оценку переменных состояния линейной динамической системы, с минимальной среднеквадратической ошибкой (СКО). Уравнения состояний и наблюдений, описывающие эволюцию и каналы измерений системы, предполагают присутствие аддитивных белых гауссовых шумов (порождающие шумы и шумы наблюдений).

Случайный процесс на выходе регистратора (см. рис. 1) описывается законом распределения Рэлея, что было экспериментально показано в работе [4]. Однако при больших отношениях сигнал/шум можно условно считать, что процесс имеет нормальное распределение. В связи с этим представляют интерес синтез алгоритма на основе классического линейного ФК и исследование возможности его применения для оценки поляризационной анизотропии метеообразований.

1. Постановка задачи оценивания в терминах фильтрации Калмана

В соответствии с методикой ФК сигнал на выходе регистратора (см. рис. 1) необходимо передать в виде математической модели наблюдений, которая в общем случае может быть представлена аддитивной смесью полезного сигнала и некоторой эквивалентной помехи:

$$Z(k) = X(k) + \varepsilon(k), \quad (2)$$

где $Z(k)$ – текущие наблюдения на выходе регистратора; $X(k)$ – регулярный ход разности ортогональных поляризационных составляющих радиолокационного сигнала; $\varepsilon(k)$ – ошибка наблюдений; $k = 1, 2, \dots, K$ – текущее дискретное время.

Очевидно, что $X(k)$ содержит информацию о значении коэффициента анизотропии метеообразования. Процесс $\varepsilon(k)$, входящий в уравнение наблюдений (2), по определению должен быть белым гауссовым шумом с нулевым средним [6, 7]. В нашем случае $\varepsilon(k)$ является случайным сигналом, описываемым законом распределения Рэлея. Поэтому уравнение наблюдений (2) должно быть преобразовано к следующему виду:

$$Z(k) = X1(k) + X2(k) + \varepsilon^*(k), \quad (3)$$

где $X1(k) = X(k)$ – регулярный ход разности ортогональных поляризационных составляющих радиолокационного сигнала; $X2(k)$ – вспомогательный случайный процесс, распределенный по закону Рэлея; $\varepsilon^*(k)$ – шум наблюдений (белый гауссовый шум с нулевым средним и известной дисперсией).

В уравнении (3) применена замена переменных (4):

$$\varepsilon(k) = X2(k) + \varepsilon^*(k). \quad (4)$$

Это позволило представить модель наблюдений в классическом виде [6, 7].

Введем вектор состояний $\mathbf{X}(k) = [X1(k), X2(k)]^T$, объединяющий неизвестные и подлежащие оцениванию переменные $X1(k)$ и $X2(k)$.

Запишем уравнения состояний в разностной форме:

$$\begin{cases} X1(k+1) = X1(k); \\ X2(k+1) = (1 - \alpha \cdot T)X2(k) + \omega(k), \end{cases} \quad (5)$$

где α – величина, обратная интервалу корреляции случайного процесса $X2(k)$; (k) – порождающий шум для процесса $X2(k)$; T – период дискретизации.

Уравнения (5) предполагают постоянство величины $X1(k)$ и случайный характер процесса $X2(k)$. Отметим, что процесс $X2(k)$ представлен марковской цепью первого порядка. Его корреляционные свойства определяются величиной α и могут быть заданы исходя из требований поставленной задачи.

Уравнения (3) и (5) полностью определяют структуру линейного фильтра Калмана [6, 7], позволяющего оценивать значения вектора $\mathbf{X}(k)$ с минимальной среднеквадратической ошибкой в каждый момент времени k по данным текущих измерений $Z(k)$.

2. Методика исследований алгоритма

Синтезированный алгоритм фильтрации был исследован на устойчивость при условии, что на его вход поступают измерения, описываемые законом распределения Рэлея.

Исследования проводились с помощью имитационного моделирования. Для исследований был разработан программный макет, включающий в себя блок имитатора измерений $Z(k)$, блок алгоритма фильтрации и блок статистической обработки результатов оценивания. Структурная схема макета приведена на рис. 2.

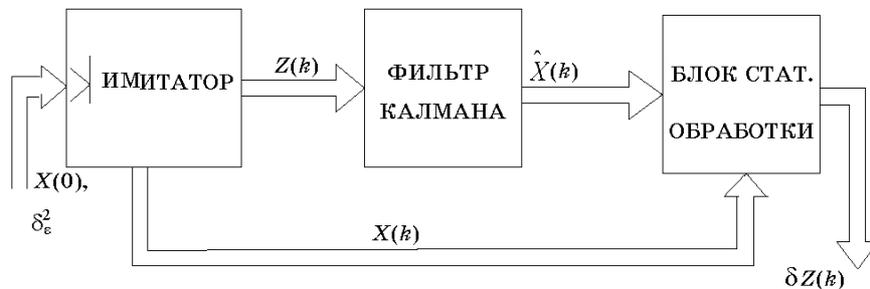


Рис. 2. Структурная схема исследовательского макета

Имитатор обеспечивает формирование последовательности отсчетов измерений $Z(k)$ в соответствии с выражением (2). Блок фильтра Калмана предназначен для фильтрации последовательности отсчетов измерений $Z(k)$. Блок статистической обработки предназначен для оценки качества работы полученного алгоритма при многократных реализациях.

Общий вид пользовательского интерфейса программы представлен на рис. 3.

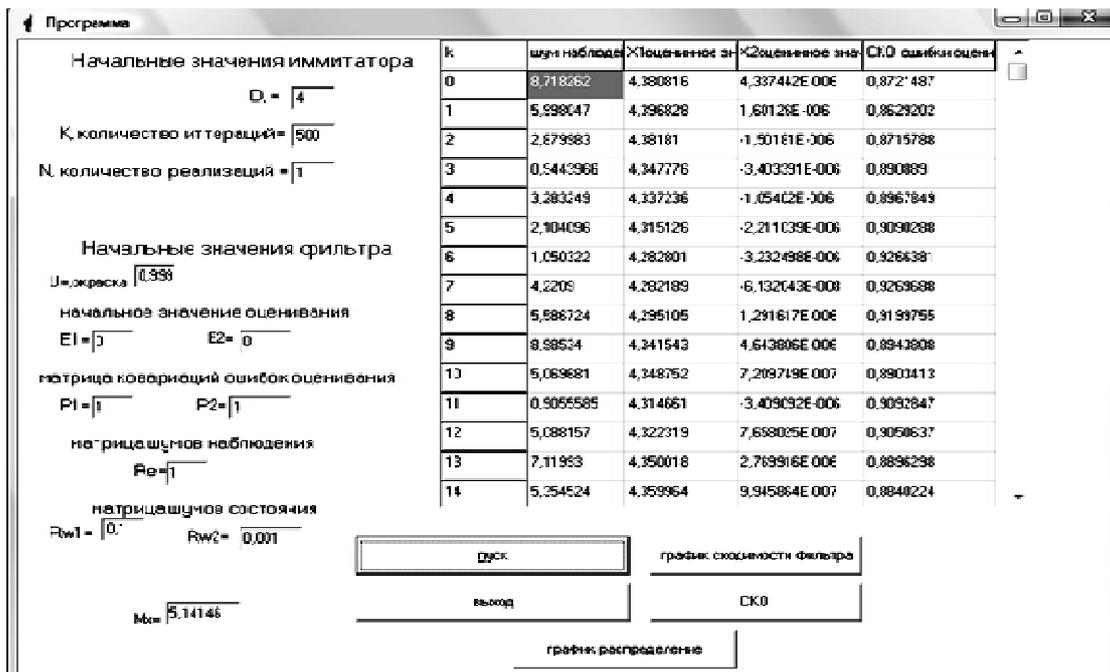


Рис. 3. Интерфейс программы

3. Исследование алгоритма

В соответствии с задачей исследования на вход фильтра Калмана подавался процесс, распределенный по закону Рэлея. Оценивание качества работы фильтра проводилось по ансамблю независимых сеансов. Каждый сеанс состоял из 100 измерений. Параметры инициации фильтра подбирались экспериментально и представляют собой значения, обеспечивающие минимум СКО ошибки оценивания и продолжительности переходного процесса. Исследование влияния шумов на качество алгоритма оценивания выполнялось изменением дисперсии.

Для оценки качества работы фильтра были использованы многократные испытания, с расчетом СКО ошибки оценивания для каждого момента времени $k = 1, 2, \dots, 100$ по ансамблю из 100 реализаций. Было выполнено исследование поведения СКО ошибки оценивания фильтра при воздействии на него шума, распределение вероятности которого описывается законом Рэлея со значениями $D=1$; $D=2$; $D=3$. Графики, показывающие поведение СКО ошибки оценивания фильтра во времени для значений $D=1$, $D=2$, $D=3$, приведены на рис. 4.

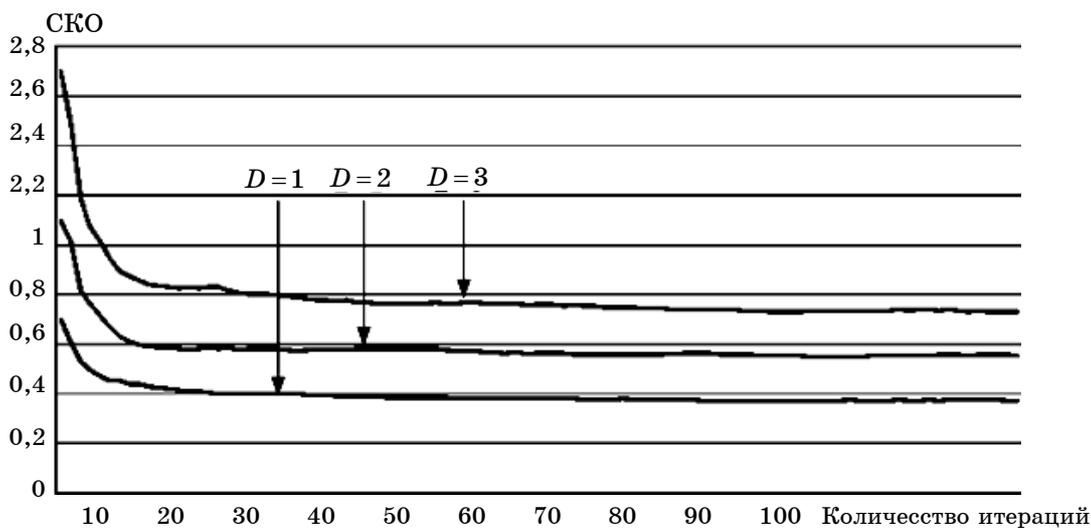


Рис. 4. График поведения СКО ошибки оценивания по ансамблю из 100 реализаций при значениях $D=1$, $D=2$, $D=3$

Результаты исследования показывают, что увеличение параметра D на 1 (увеличение мощности шумов на входе фильтра) приводит к пропорциональному росту СКО ошибки оценивания приблизительно на 0,2. Тем не менее полученный алгоритм оценивания работает устойчиво и позволяет компенсировать ошибку измерений в установившемся режиме в 3 раза. При этом переходные процессы в фильтре заканчиваются к моменту $k \approx 20$.

Таким образом, можно сделать заключительный вывод о том, что в указанном диапазоне значений параметра $D=1$, $D=2$, $D=3$ использование фильтра Калмана допустимо, при этом обеспечивается субоптимальная, с точки зрения минимума СКО, оценка коэффициента анизотропии метеообразований.

Литература

1. Шупяцкий А.Б. Радиолокационное рассеяние несферическими частицами // Труды ЦАО. — 1959. — Вып. 9. — С. 39–52.
2. Гершензон Ю.М. Рассеяние радиоволн эллиптической поляризации несферическими частицами атмосферы / Ю.М. Гершензон, А.Б. Шупяцкий // Труды ЦАО. — 1961. — Вып. 36. — С. 102–108.
3. Бадулин Н.Н. Дистанционное зондирование микрофизической структуры облаков с использованием поляризационной манипуляции / Н.Н. Бадулин, А.П. Бацула, Е.Б. Кульшенева и др. // Изв. вузов СССР. Физика. — 1983. — № 6. — Деп. ВИНТИ. — № 219.
4. Бадулин Н.Н. Экспериментальное исследование анизотропии рассеяния радиолокационных сигналов облаками и осадками / Н.Н. Бадулин, А.П. Бацула, Е.Б. Кульшенева, и др. // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. — 1984. — Т. 20, № 6. — С. 505–510.
5. Бадулин Н.Н. Рассеяние радиолокационных сигналов совокупностью несферических частиц (доклад) / Н.Н. Бадулин, С.В. Матвеев / IX Междунар. науч.-техн. конф.

«Радиолокация, навигация, связь»: сб. докладов. – Воронеж: САКВОЕЕ, 2003. – С. 1730.

6. Комаров В.С. Динамико-стохастические методы и их применение в прикладной метеорологии / В.С. Комаров, Ю.Б. Попов, С.С. Суворов / под общ. ред. Г.Г. Матвиенко. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2004. – 236 с.

7. Сейдж Э.П. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении / Э.П. Сейдж, Дж.Л. Мэлс. – М.: Связь, 1976. – С. 496.

Бадулин Николай Николаевич

Д-р техн. наук, профессор каф. радиоэлектроники Сургутского гос. университета (СурГУ)
Эл. почта: bnn11@mail.ru

Попов Юрий Борисович

Канд. техн. наук, доцент каф. радиоэлектроники СурГУ
Тел.: 89224-05-05-47
Эл. почта: popovyub@mail.ru

Хлопотников Леонид Николаевич

Аспирант СурГУ
Тел.: 8 922 2-48-00-39
Эл. почта: f2extreem@rambler.ru

Badulin N.N., Popov Y.B., Khlopotnikov L.N.

The usage of Kalman's filtration device in estimating polarization anisotropy of moisture targets by radar method

In this article we discuss the questions about the algorithm creation for estimation of polarization anisotropy of moisture targets. The algorithm is based on the theory of Kalman's filtration on the assumption of the fact that the measurement noises are described by the distribution law different from the normal one.

Keywords: polarization, polarization anisotropy, filtering.
