

УДК 551.501.81

## МЕТОДИКА ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ОПАСНЫМИ ЯВЛЕНИЯМИ ПОГОДЫ

И.Е. Кузнецов, А.В. Рыжов

*Военный учебно-научный центр ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)*

Предлагается методика оптимального оценивания и фильтрации профиля радиолокационной отражаемости метеообъектов, позволяющая повысить эффективность идентификации опасных явлений погоды по радиолокационным наблюдениям.

Радиометеорологические измерения являются основным источником информации о возникновении и развитии опасных явлений погоды (грозы, града, шквала, ливневого дождя, обледенения воздушных судов и наземных сооружений и т.д.), которые угрожают не только техническим средствам, но и жизни и здоровью людей.

Известно [1], что такие измерения сопровождаются существенными ошибками, обусловленными следующими причинами: изменчивостью микрофизических характеристик метеообъекта в пространстве и во времени; искажением диаграммы направленности антенны; техническими особенностями радиолокационной станции; случайными факторами, влияющими на ослабление радиолокационного сигнала при распространении в атмосфере. В настоящее время радиолокационные измерения проводятся с использованием автоматизированных управляющих вычислительных комплексов «АКСОПРИ» и «Метеоячейка», в которых используются алгоритмы распознавания опасных явлений погоды (ОЯП), основанные на данных о профиле радиолокационной отражаемости ( $Z$ ). Вместе с тем, при последовательном проведении измерений радиолокационных характеристик метеообъекта и получении профиля  $Z(H)$ , возникает эффект накопления ошибок. В отдельных районах провести замер  $Z$  не представляется возможным из-за влияния «местников». Эти факты снижают качество распознавания ОЯП по радиолокационным данным.

В работе предлагается методика повышения эффективности радиолокационных наблюдений за опасными явлениями погоды, основанная на методах стохастической фильтрации и позволяющая компенсировать воздействие на получаемую радиолокационную информацию случайных ошибок измерений, а также осуществлять восстановление  $Z$  в недоступных для измерения районах.

Сформулируем в общем виде задачу управления качеством радиометеорологических измерений. Будем вести рассуждение для случая замеров, проводимых дискретно в пространстве и времени. Пусть непосредственному измерению доступна векторная (в общем случае) случайная последовательность  $Y(\xi_v)$ , являющаяся детерминированной функцией от вектора радиолокационных характеристик облака  $X(\xi_v)$  и случайной ошибки измерений вектора  $Y(\xi_v)$  радиолокационной станцией –  $N(\xi_v)$ . В качестве  $X(\xi_v)$  могут выступать любые признаки распознавания, являющиеся по своей природе случайными величинами. Например, измеряемая в моменты времени  $t_1, \dots, t_n$  величина радиолокационной отражаемости  $Z$  на каком-либо уровне  $H$  или измерение  $Z$  по высоте в фиксированный момент времени. Представим метеообъект линейной динамико-стохастической системой с характеризующим его состояние фазовым вектором  $X(\xi_v)$ . Это значит, что изменение среднего значения признака распознавания  $X$  от момента  $\xi_{v-1}$  к моменту  $\xi_v$  можно описать линейным уравнением. Пусть, кроме того, измеряемая величина  $Y$  также является линейной комбинацией фазового вектора  $X(\xi_v)$  и случайной ошибки измерения  $N(\xi_v)$ . Тогда проводимую процедуру измерений вектора радиолокационных характеристик  $X(\xi_v)$  можно представить в виде классических уравнений состояния и наблюдения [2]:

$$X(\xi_v) = B(\xi_v) \cdot X(\xi_{v-1}) + N_0(\xi_v), \quad (1)$$

$$Y(\xi_v) = A(\xi_v) \cdot X(\xi_v) + N(\xi_v), \quad \forall v = \overline{1, \nu}. \quad (2)$$

Следовательно, функция  $B(\xi_v)$  в уравнении состояния (1) характеризует трансформацию интересующего нас вектора  $X$  от момента  $\xi_{v-1}$  к моменту  $\xi_v$ . Случайная величина описывает флуктуацию признака  $X$ , обусловленную случайными изменениями микрофизических характеристик облака в момент  $\xi_v$ . Она целиком определяется состоянием облачности, т.е. зависит от её типа, стадии развития, интенсивности протекающих процессов и т.д. Величина  $N_0(\xi_v)$  распределена нормально с нулевым средним и имеет соответствующую матрицу ковариации  $\Sigma_0(\xi_v)$ .

Таким образом,  $N_0(\xi_v)$  совместно с  $\Sigma_0(\xi_v)$  полностью описывают состояние метеобъекта. Функция  $A(\xi_v)$  в уравнении наблюдения (2) показывает, каким образом  $X$  преобразуется в непосредственно измеренную величину  $Y$ , а  $N(\xi_v)$  представляет собой случайную величину, характеризующую ошибку измерения.

Задача состоит в том, чтобы, располагая необходимыми априорными сведениями о функциях  $A(\xi_v)$ ,  $B(\xi_v)$ ,  $N_0(\xi_v)$ ,  $N(\xi_v)$ , а также доступной непосредственному наблюдению реализацией случайной последовательности  $Y(\xi_v)$  для каждого момента  $\xi_v$  получить оптимальную по критерию минимума среднеквадратической ошибки оценку  $\hat{X}(\xi_v)$  вектора радиолокационных характеристик метеобъекта  $X(\xi_v)$ .

Существует несколько способов получения уравнений фильтра, основанных на соотношении (3). Их анализ позволяет заключить, что фильтр Калмана представляет собой наилучший (в смысле минимума дисперсии ошибки) линейный фильтр независимо от вида распределения величин  $X$ ,  $N_0$  при условии, что начальное состояние и флуктуации объекта, а также данные измерений имеют распределения Гаусса [2,3].

Решим задачу реализации процедуры фильтрации Калмана применительно к измерению конкретной радиолокационной характеристики метеобъекта, а, именно, вертикального профиля его отражаемости  $Z(H)$ . Поскольку данная величина является наиболее информативным параметром при распознавании опасных явлений погоды радиолокационным методом.

Согласно сказанному выше, опишем облако как линейную динамико-стохастическую систему со случайно изменяющимся в пространстве фазовым вектором  $Z_v$  – радиолокационной отражаемостью на высоте  $H_v$ .

Функция  $Z(H)$  – вид вертикального профиля радиолокационной отражаемости, является относительно стабильной характеристикой состояния конвективных облаков и неконвективных облачных систем [4]. Поэтому существует возможность интерпретировать проводимые измерения как стационарные во времени, последовательные замеры величины  $Z$  на различных высотах  $H$ . При этом величину шага по высоте  $\Delta H = H_v - H_{v-1}$  необходимо брать большей радиуса пространственной корреляции микрофизических характеристик для облачных систем соответствующего типа, поскольку при использовании уравнений фильтрации в форме (4) – (6) необходимым условием является отсутствие статистической связи между величинами  $X_1, \dots, X_v, \dots$ .

Методика определения радиолокационной отражаемости с помощью современных метеорологических радиолокационных станций (МРЛС) позволяет принять, что величина  $Z$  измеряется на станции непосредственно.

Таким образом, в уравнении наблюдения (2) можем записать  $A_v = I$ . Учитывая тот факт, что фазовый вектор метеобъекта  $Z_v$  одномерен, то уравнения фильтра можно преобразовать и свести к двум, соответствующим случаю измерения вертикального профиля радиолокационной отражаемости облачной системы  $Z(H)$

$$\hat{Z}_v = \beta_v \hat{Z}_{v-1} + \frac{R_v^2}{\sigma_v^2} [\tilde{Z}_v - \beta_v \hat{Z}_{v-1}] \quad (3)$$

$$\frac{1}{R_v^2} = \frac{1}{\beta_v^2 R_{v-1}^2 + \sigma_{0v}^2} + \frac{1}{\sigma_v^2} \quad (4)$$

Анализ уравнений (3) и (4) показывает, что оптимальная оценка радиолокационной отражаемости  $\hat{Z}_v$  на высоте  $H_v$  формируется как сумма экстраполированной оценки  $\hat{Z}_{v3} = \beta_v \hat{Z}_{v-1}$  и поправки к ней. При этом  $\hat{Z}_{v3}$  представляет собой произведение оптимальной оценки на уровне  $H_{v-1}$  и переходного множителя  $\beta_v$ , аналогичного по смыслу функции  $B(\xi_v)$  в (1). Очевидно, что  $\beta_v$  зависит от типа облачной системы, условий образования, стадии развития и т.д. Параметром  $\beta_v$  определяется

точность описания состояния метеобъекта, что непосредственно влияет на качество фильтрации через соответствующее изменение величины  $\sigma_{0v}^2$ . Второе слагаемое в уравнении (6) представляет собой разность между значениями экстраполированной оценки  $\hat{Z}_{v3}$  и фактически измеренной величины отражаемости  $\tilde{Z}_v$ , умноженная на весовой коэффициент, который задается отношением дисперсии  $R_v^2$  формируемой оценки  $\hat{Z}_v$  к дисперсии  $\sigma_v^2$  случайной ошибки измерения МРЛС величины  $Z$ .

Таким образом, повышение эффективности радиолокационных наблюдений осуществляется путем фильтрации измерений вертикального профиля радиолокационной отражаемости  $Z(H)$  и предусматривает выполнение следующих операций.

1. По имеющейся с прошлого шага информации о величине  $R_{v-1}^2$  и априорных сведениях о  $\beta_v$ ,  $\sigma_{0v}^2$ ,  $\sigma_v^2$  определяется дисперсия оптимальной оценки  $R_v$  на данной высоте зондирования облака  $H$ .

2. Вычисляется «коэффициент усиления» –  $R_v^2 / \sigma_v^2$ .

3. По имеющейся с прошлого шага оценке  $\hat{Z}_{v-1}$  проводится экстраполяция величины радиолокационной отражаемости облака на следующий уровень  $\hat{Z}_{v3} = \beta_v \hat{Z}_{v-1}$ .

4. Производится замер радиолокационной отражаемости на высоте уровня зондирования  $\hat{Z}_v$ . При невозможности проведения замера радиолокационной отражаемости используется значение, интерполированное с предыдущего уровня.

5. На основании полученных значений величин  $Z_{v3}$ ,  $\tilde{Z}_v$ ,  $R_v^2 / \sigma_v^2$  вычисляется оптимальная оценка  $\hat{Z}_v$ .

Из сказанного выше можно заключить, что при постоянстве технических характеристик МРЛС качество процедуры фильтрации будет зависеть только от точности априорного описания метеобъекта. Поэтому характеристикой эффективности оптимального управления будет являться зависимость дисперсий оценок  $R_v^2$  от характеристик станции –  $\sigma_v^2$ .

С этой целью в работе была исследована зависимость  $R_v^2(\sigma_v)$  для облаков различного типа и для различных высот зондирования  $H_v$ .

В качестве примера на рисунке 1 приведены результаты отдельных численных экспериментов по фильтрации измерений профилей  $Z(H)$  облаков различного типа. Результатом проведения серии экспериментов явились расчеты оценок дисперсий  $\hat{R}_v^2$  по формуле:

$$\hat{R}_v^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{Z}_{iv} - Z_v)^2, \quad (5)$$

где  $Z_v$  – фактическое значение радиолокационной отражаемости на уровне  $H_v$ ;  $\hat{Z}_{iv}$  – оценка радиолокационной отражаемости, полученная при использовании процедуры фильтрации в  $N$  испытаниях. Анализ результатов расчетов позволяет заключить следующее.

Разработанная процедура на основе фильтрации профилей отражаемости  $Z(H)$  обладает устойчивостью к росту случайных ошибок радиолокационной станции, характеризуемых величиной  $R_v^2/\sigma_v^2$ . Так, величина  $\hat{R}_v^2$  стабилизируется на уровне 0,2; 0,18; 0,15 для слоисто-дождевой облачности, кучево-дождевой облачности с грозой и ливнем соответственно.

Характеристики точности процедуры оптимального управления радиометеорологическими измерениями для уровня высоты, характеризуемого минимальными флуктуациями модели, превосходят характеристики для уровня с максимальными флуктуациями. Следовательно, уменьшение величин  $\sigma_{0v}$  ведёт к росту качества проводимых измерений  $Z(H)$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5 / РД 52.04.320-91. С.-Петербург: Гидрометеоздат, 1993.
2. Браммер К., Зиффлинг Г. Фильтр Калмана – Бьюси: пер. с англ. / Под ред. И.Е. Казакова. М.: Наука, 1982.
3. Сейдж Э., Мелс Дж. Теория оценивания и её применение в связи и управлении: пер. с англ. / Под ред. Б.Р. Левина. М.: Связь, 1976.
4. Атмосфера. Справочник / Под ред. Ю.С. Седунова. Л.: Гидрометеоздат, 1991.