

УДК.551.508.8

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ ЗА СЧЕТ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ МЕТОДОВ СОПРОВОЖДЕНИЯ РАДИОЗОНДА В ПОЛЕТЕ

Э.А. БОЛЕЛОВ, Ю.М. ЕРМОШЕНКО, М.Б. ФРИДЗОН

В работе рассматривается общая методика решения задачи синтеза алгоритмов комплексирования радиолокационного и радионавигационного методов сопровождения радиозонда.

Ключевые слова: радиозондирование атмосферы, комплексная обработка информации.

ВВЕДЕНИЕ

Одой из фундаментальных основ метеорологического обеспечения полётов современной авиации является радиозондирование атмосферы. Радиозондирование, осуществляемое на аэрологической сети России с помощью аэрологических радиолокационных вычислительных комплексов (АРВК), позволяет получать общую картину вертикальной и горизонтальной стратификации атмосферы, необходимую для обеспечения безопасной и экономически целесообразной деятельности авиации. К сожалению, в настоящее время сетевое зондирование атмосферы осуществляется только 2 раза в сутки и при расстояниях между аэрологическими станциями, часто достигающими 1000 и более км. Указанные рамки заведомо превышают границы временной и пространственной изменчивости метеорологических элементов и опасных явлений погоды [1]. на различных высотах в атмосфере. Кроме того, на аэрологической сети в отдельных пунктах нередко наблюдаются пробелы в метеоданных при зондировании или срывы зондирования в отдельных пунктах вследствие отказов техники, отсутствия расходных материалов, электроэнергии или иных объективных причин. При анализе крупномасштабных процессов, отсутствие данных зондирования в отдельных пунктах или отдельных частях телеметрической информации относительно мало сказывается на результатах анализа и прогнозах погоды.

Ситуация резко меняется, при необходимости обслуживания полётов авиации, в особенности, при повышенных требованиях к надежности и безопасности полётов (транспортирование уникальных или невосполнимых ценностей, полёты особо охраняемых персон и т.д.). В этих случаях необходимо использовать специальную аппаратуру и программное обеспечение, позволяющие обеспечить предельно возможную надежность получения полной метеорологической информации в требуемом месте и моменте времени.

Повышение надёжности работы радиозонда, как составной части системы радиозондирования атмосферы, возможно дублированием наиболее уязвимых участков измерительных схем, предварительной тщательной проверкой и отбором зондов, в общем, традиционными методами повышения надёжности. Возможности повышения надёжности работы наземных средств сопровождения радиозондов ограничиваются самим методом сопровождения радиозонда. В частности, используемый на отечественной сети радиолокационный метод сопровождения радиозонда, достаточно надежно реализуется в различных физико-географических зонах, но не обладает достаточной точностью определения координат радиозонда в полёте. В то же время, используемый в ряде ведущих зарубежных аэрологических сетей и разрабатываемый в настоящее время в нашей стране спутниковый радионавигационный метод местоопределения радиозонда позволяет значительно повысить точность определения высоты и ветра в атмосфере, но его надёжность в условиях нашей страны, в особенности, в северных широтах недостаточна. Как показала практики применения таких систем зондирования в получаемой

телеметрической информации часто наблюдаются пропуски на достаточно длительное время [1], [2].

Повышение надёжности работы системы радиозондирования при достижении высокой точности получаемой метеорологической информации возможно на основе комплексирования традиционного, то есть радиолокационного, и радионавигационного методов сопровождения радиозонда [2].

Настоящая статья посвящена рассмотрению общей методики синтеза алгоритмов оптимальной комплексной обработки информации от аппаратуры спутниковой радионавигационной системы (СРНС) и радиолокационной станции (РЛС) аэрологического зондирования атмосферы.

1. ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ МАРКОВСКОЙ ТЕОРИИ ОЦЕНИВАНИЯ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОГО И РАДИОНАВИГАЦИОННОГО МЕТОДОВ СОПРОВОЖДЕНИЯ РАДИОЗОНДА

Суть марковской теории оптимального оценивания случайных процессов (МТО) представляет собой созданный на единой основе марковских и условных марковских процессов строгий и корректный (обычно векторно-матричный) математический аппарат, базирующийся на основных положениях теории статистических решений. Аппарат МТО предназначен для проектирования и создания оптимальных (или близких к ним) радиотехнических или других близких к ним радиотехнических систем [3]. Методы и алгоритмы МТО непосредственно ориентированы на применение цифровой, гибридной и другой современной и перспективной технологии. Следует отметить, что МТО имеет весьма широкую сферу применения. Дело в том, что методы теории вопреки нередко бытующему на практике даже среди специалистов ошибочному мнению не требуют от рассматриваемых процессов того, чтобы векторы состояния, наблюдения, сигналов или помех были бы обязательно сами по себе марковскими процессами. На самом деле методы МТО предъявляют к процессам гораздо менее жесткое требование: необходимо, чтобы векторы состояния и наблюдения лишь в совокупности образовывали векторный марковский процесс.

Целью комплексирования радиолокационного и радионавигационного методов сопровождения радиозонда является их интеграция в единую систему (комплекс), в которой осуществляется совместная обработка информации. Потребность в одновременном измерении одних и тех же (или функционально связанных) параметров системами, возможно даже работающими на различных физических принципах, обусловлена тем, что каждый из методов в отдельности не удовлетворяет предъявляемым требованиям [3].

Наибольший выигрыш от комплексирования измерителей, естественно удастся получить, решив соответствующую задачу синтеза, что дает возможность определить оптимальные структуру и характеристики системы комплексной обработки информации (КОИ) [3], [4]. Широкие возможности методов МТО при разработке алгоритмов КОИ во многом обусловлены тем, что марковские методы позволяют реализовать оптимальное комплексирование измерителей не только на уровне вторичной обработки информации (обработка данных), но и при первичной обработке информации (обработка сигналов).

В связи с тем, что обработка информации осуществляется в вычислительных комплексах целесообразно для решения задачи комплексирования радиолокационного и радионавигационного методов сопровождения радиозонда использовать вторичную дискретную обработку информации.

2. ОБЩАЯ МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ СИНТЕЗА АЛГОРИТМОВ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОГО И РАДИОНАВИГАЦИОННОГО МЕТОДОВ СОПРОВОЖДЕНИЯ РАДИОЗОНДА В ПОЛЕТЕ

Методика синтеза оптимальных дискретных алгоритмов комплексной обработки информации заключается в следующем [3]. Исчерпывающее решение задачи оптимального по любо-

му заданному критерию оценивания вектора состояния параметров движения радиозонда $\mathbf{X}(k+1)$, при наблюдении реализации процесса $\mathbf{Y}[0, k+1]$ может быть получено с помощью апостериорной плотности вероятности (АПВ).

Для вычисления АПВ при дискретных наблюдениях, рассмотрим совместный процесс $\mathbf{Z}^T(k+1) = [\mathbf{X}^T(k+1), \mathbf{Y}^T(k+1)]$, который описывается стохастическим разностным уравнением:

$$\mathbf{Z}(k+1) = \Phi_z[k+1, k; \mathbf{Z}(k)] + \Gamma_z[k+1, k; \mathbf{Z}(k)] \mathbf{N}_z(k), \quad (1)$$

где $\mathbf{N}_z(k)$ — векторы независимых гауссовских случайных величин с нулевыми математическими ожиданиями и единичными дисперсиями.

Предположим, что функции, входящие в правую часть уравнения (1), имеют вид:

$$\Phi_z[k+1, k; \mathbf{Z}(k)] = \begin{bmatrix} \Phi_{xx}[k+1, k; \mathbf{Y}(k)]\mathbf{X}(k) + \Phi_{xy}[k+1, k; \mathbf{Y}(k)] \\ \Phi_{yx}[k+1, k; \mathbf{Y}(k)]\mathbf{X}(k) + \Phi_{yy}[k+1, k; \mathbf{Y}(k)] \end{bmatrix}; \quad (2)$$

$$\Gamma_z[k+1, k; \mathbf{Y}(k)] = \begin{bmatrix} \Gamma_x[k+1, k; \mathbf{Y}(k)] \\ \Gamma_y[k+1, k; \mathbf{Y}(k)] \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Совместный процесс $\mathbf{Z}(k+1)$ является марковским и согласно (1) имеет гауссовскую плотность вероятности перехода [3]:

$$\pi_z[\mathbf{Z}(k+1)|\mathbf{Z}(k)] = \mathbf{N}\{\mathbf{Z}(k+1) - \Phi_z; \mathbf{B}_{zz}\}, \quad (4)$$

где, согласно (3):

$$\mathbf{B}_{zz} = \Gamma_z \Gamma_z^T = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{xx}[k+1, k; \mathbf{Y}(k)] & \mathbf{B}_{xy}[k+1, k; \mathbf{Y}(k)] \\ \mathbf{B}_{yx}[k+1, k; \mathbf{Y}(k)] & \mathbf{B}_{yy}[k+1, k; \mathbf{Y}(k)] \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\text{здесь } \mathbf{B}_{xx} = \Gamma_x \Gamma_x^T, \mathbf{B}_{xy} = \Gamma_x \Gamma_y^T, \mathbf{B}_{yx} = \Gamma_y \Gamma_x^T, \mathbf{B}_{yy} = \Gamma_y \Gamma_y^T. \quad (6)$$

Апостериорная плотность вероятности оцениваемых процессов удовлетворяет рекуррентному уравнению Стратоновича:

$$\begin{aligned} p[\mathbf{X}(k+1)|\mathbf{Y}_0^{k+1}] &= \\ &= \frac{\int \pi_z[\mathbf{X}(k+1), \mathbf{Y}(k+1)|\mathbf{X}(k), \mathbf{Y}(k)] p[\mathbf{X}(k)|\mathbf{Y}_0^k] d\mathbf{X}(k)}{\iint \pi_z[\mathbf{X}(k+1), \mathbf{Y}(k+1)|\mathbf{X}(k), \mathbf{Y}(k)] p[\mathbf{X}(k)|\mathbf{Y}_0^k] d\mathbf{X}(k) d\mathbf{X}(k+1)}. \end{aligned} \quad (7)$$

В соответствии с [3] можно показать, что решение уравнения (7) для моделей (1) — (3) имеет вид:

$$p[\mathbf{X}(k+1)|\mathbf{Y}_0^{k+1}] = \mathbf{N}\{\mathbf{X}(k+1) - \mathbf{X}^*(k+1); \mathbf{P}(k+1)\}, \quad (8)$$

где $\mathbf{X}^*(k+1)$ и $\mathbf{P}(k+1)$ — апостериорные вектор математического ожидания и матрица центральных моментов второго порядка, которые определяются соотношениями:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}^*(k+1) = & \Phi_{xx}[k+1, k; \mathbf{Y}(k)]\mathbf{X}^*(k) + \Phi_{xy}[k+1, k; \mathbf{Y}(k)] + \\ & + \mathbf{K}(k+1)\{\mathbf{Y}(k+1) - \Phi_{yx}[k+1, k; \mathbf{Y}(k)]\mathbf{X}^*(k) - \Phi_{yy}[k+1, k; \mathbf{Y}(k)]\}, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{K}(k+1) = & [\Phi_{xx}[k+1, k; \mathbf{Y}(k)]\mathbf{P}(k)\Phi_{yx}^T[k+1, k; \mathbf{Y}(k)] + \mathbf{B}_{xy}[k+1, k; \mathbf{Y}(k)] \times \\ & \times [\Phi_{yx}[k+1, k; \mathbf{Y}(k)]\mathbf{P}(k)\Phi_{yx}^T[k+1, k; \mathbf{Y}(k)] + \mathbf{B}_{yy}[k+1, k; \mathbf{Y}(k)]]^{-1}, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(k+1) = & [\Phi_{xx}[k+1, k; \mathbf{Y}(k)]\mathbf{P}(k)\Phi_{xx}^T[k+1, k; \mathbf{Y}(k)] + \mathbf{B}_{xx}[k+1, k; \mathbf{Y}(k)] - \\ & - \mathbf{K}(k+1)[\mathbf{B}_{xy}[k+1, k; \mathbf{Y}(k)] + \Phi_{xx}[k+1, k; \mathbf{Y}(k)]\mathbf{P}(k)\Phi_{yx}^T[k+1, k; \mathbf{Y}(k)]]^T, \end{aligned} \quad (11)$$

здесь $\mathbf{K}(k+1)$ — матрица оптимальных коэффициентов передачи.

Реализация алгоритмов (9-11) на $(k+1)$ -м шаге осуществляется следующим образом:

– по известным значениям функций Φ_{xx} , Φ_{yx} , $\mathbf{B}_{xy}$, $\mathbf{B}_{yy}$ и найденной на предыдущем шаге матрице $\mathbf{P}(k)$ по формуле (3.10) рассчитывается матрица оптимальных коэффициентов передачи $\mathbf{K}(k+1)$ дискретного фильтра;

– на основании $\mathbf{Y}(k+1)$ по формуле (9) определяется оптимальная оценка $\mathbf{X}^*(k+1)$;

– с помощью (11) вычисляется матрица $\mathbf{P}(k+1)$, необходимая для расчетов на следующем шаге.

Общая методика решения задачи синтеза алгоритмов комплексирования радиолокационного и радионавигационного методов сопровождения радиозонда заключается в следующем. На основе измеренных значений навигационных параметров радиозонда на выходе измерителей сформируем компоненты вектора наблюдения $\mathbf{Y}[k+1]$, который описывается соотношением:

$$\mathbf{Y}(k+1) = \Phi_{yx}\mathbf{X}(k+1) + \Phi_{yy} + \Gamma_y\mathbf{N}(k), \quad (12)$$

где $\mathbf{N}(k)$ - вектор стандартных дискретных белых гауссовских шумов.

Далее определяется пространство состояний. Математические модели компонент, входящих в вектор состояния $\mathbf{X}(k+1)$, приводятся к единой системе координат. Для сокращения размерности вектора состояния и, тем самым, упрощения алгоритмов оптимальной комплексной вторичной обработки информации (уменьшения необходимого объема вычислений) используем метод распределения информации. Так как под вектором наблюдения и вектором известных функций времени понимаются совокупности переменных, известных в результате измерения, то от воли исследователя или разработчика зависит, сигналы каких измерителей отнести к вектору наблюдения, а каких — к вектору известных функций времени. Эта возможность и порождает метод распределения информации.

Модель вектора состояния $\mathbf{X}(k+1)$ в общем виде описывается уравнением:

$$\mathbf{X}(k+1) = \Phi_{xx}\mathbf{X}(k) + \Phi_{xy} + \Gamma_x\mathbf{N}(k). \quad (13)$$

В соответствии с используемыми математическими моделями определяют матрицы, входящих в выражения (12) и (13).

Задачу синтеза оптимальных алгоритмов КОИ в таком случае можно сформулировать следующим образом. Имея априорные сведения о векторе состояния и располагая наблюдениями, необходимо определить наилучшую оценку вектора состояния $\hat{\mathbf{X}}(k+1)$, которая должна удовлетворять критерию минимума апостериорного среднего риска [3],[4].

$$\hat{\mathbf{X}}: \min_{\hat{\mathbf{X}}} \left\{ \int c(\mathbf{X}, \hat{\mathbf{X}}) p[\mathbf{X} | \mathbf{Y}_0^{k+1}] d\mathbf{X} \right\}, \quad (14)$$

где $p[\mathbf{X} | \mathbf{Y}_0^{k+1}]$ — апостериорная плотность вероятности отсчета $\mathbf{X}(k+1)$ по результатам наблюдения реализации $\mathbf{Y}_0^{k+1}$; $c(\mathbf{X}, \hat{\mathbf{X}})$ — функция потерь, задаваемая на основании выбранного критерия оптимизации.

При квадратичной функции потерь оптимальная оценка вектора состояния (13) по наблюдениям (12) представляет собой апостериорное математическое ожидание и описывается соотношениями (9 — 11).

Таким образом, для решения задачи синтеза алгоритмов комплексирования радиолокационного и радионавигационного методов сопровождения радиозонда в полете в первую очередь требуется сформировать конкретные математические модели векторов состояния и наблюдения для радиолокационного и радионавигационного методов сопровождения радиозонда.

ЛИТЕРАТУРА

1. Решетов В.Д. Изменчивость метеорологических элементов в атмосфере. — Л.: Гидрометеиздат, 1973.
2. Фридзон М.Б., Маров А.С., Дубиль Р.Я. Разработка малогабаритной системы аэрологического радиозондирования атмосферы на основе совмещения ГЛОНАСС/РЛС принимающих устройств. ФГУП «Центр эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры» // Научно-техническая конференция «Проблемные вопросы открытия и эксплуатации трасс запусков космических аппаратов, баллистического и метеорологического обеспечения пусков ракет носителей». 25–26 марта 2010 г. Тезисы докладов.
3. Ярлыков М.С., Миронов М.А. Марковская теория оценивания случайных процессов. — М.: Радио и связь, 1993.
4. Ярлыков М.С. Статистическая теория радионавигации. — М.: Радио и связь, 1985.

IMPROVING THE RELIABILITY OF THE SYSTEM OF RADIOSONDE MEASUREMENTS AT THE EXPENSE OF THE AGGREGATION METHODS FOR TRACKING OF THE RADIOSONDE IN FLIGHT

The paper describes a general method of solving the problem of synthesis of algorithms of integration of radar and radio navigation methods for tracking of the radiosonde.

Key words: radiosonde atmospheric, complex information processing.

REFERENCES

1. Reshetov V.D. The variability of meteorological elements in the atmosphere. — L.: Gidrometeoizdat, 1973.

2. Fridzon M.B., Marov A.S., Dubil R.J. The development of compact system upper-air radi-sonde measurements on the basis of combining GLONASS/radar receiving devices. FSUE «Center for exploitation of ground space infrastructure» Scientific-technical conference «problems of discovery and exploitation of traces of zapuskov spacecraft, ballistic and meteorological support of rocket carriers». 25–26 March 2010. Abstracts.

3. Yarlykov M.S., Mironov M.A. Markov estimation theory random processes. — M.: Radio and communication, 1993.

4. Yarlykov M.S. Statistical theory of radio navigation. — M.: Radio and communication, 1985.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Болелов Эдуард Анатольевич, (1967 г.р.) окончил ВВИА имени профессора Н.Е. Жуковского (1997), кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технической эксплуатации радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта МГТУ ГА, автор 40 научных работ, область научных интересов — эксплуатация сложных технических систем, обработка информации в навигационных комплексах, e-mail: e.bolelov@mstuca.aero.

Ермошенко Юлия Марковна, окончила МИИТ (1996), заместитель генерального директора по технике и юридическому сопровождению производства ООО «Аэроприбор», автор 25 научных работ, область научных интересов — радиозондирование атмосферы, e-mail: meteoru@yandex.ru.

Фридзон Марк Борисович, (1936 г.р.) окончил Казанский государственный университет (1960), доктор технических наук, доцент, заведующий НИЛ-4 МГТУ ГА, автор более 120 научных работ, область научных интересов — радиозондирование атмосферы, e-mail: markfr.36@mail.ru.