

РЕЗУЛЬТАТЫ ОТРАБОТКИ АЛГОРИТМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ В СОСТАВЕ БОРТОВОГО КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЕТОМ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Л.И. Пономарев, Н.Н. Калмыков, М.И. Кац, Ю.А. Иванов, В.Г. Важенин, В.И. Вербицкий, Н.А. Дядьков, С.А. Мельников

RESULTS OF THE DEVELOPMENT OF ALGORITHMS AND PROSPECTS OF COMBINED RADAR USE IN THE ONBOARD FLIGHT CONTROL SYSTEMS OF AIRCRAFT

L.I. Ponomarev, N.N. Kalmykov, M.I. Kats, Y.A. Ivanov, V.G. Vazhenin, V.I. Verbitsky, N.A. Dyadkov, S.A. Melnikov

Приводятся результаты отработки алгоритмов функционирования комбинированного радиолокационного измерителя (КРИ), измеряющего высоту полета и составляющие вектора скорости летательного аппарата. КРИ используется в составе бортового комплекса управления в качестве датчика внешней информации для коррекции бесплатформенной инерциальной навигационной системой, управления движением в вертикальной плоскости и в КЭНС по рельефу местности. Результаты летных испытаний КРИ на борту самолета ЯК-52 подтвердили достижимость требуемых точностных характеристик и показали перспективность применения КРИ для решения указанных задач.

Ключевые слова: радиолокационный измеритель, высота полета, бортовой комплекс управления.

The article presents the results of the development of algorithms of combined operation of the radar, which measures the altitude and velocity components of the aircraft. Radar is used in the onboard control systems as a sensor of external information to correct strapdown inertial navigation system, traffic control in the vertical plane and terrain navigation system. The results of flight tests aboard YAK-52 confirmed the accessibility of required accuracy characteristics and showed promise to solve these problems.

Keywords: radar, flight altitude, onboard control systems.

Комбинированный радиолокационный измеритель (КРИ) предназначен для измерения геометрической высоты полета, составляющих вектора скорости летательного аппарата (ЛА) в связанной системе координат, средней высоты морских волн и формирования признака перехода вода/суша. КРИ используется в составе бортового комплекса управления (БКУ) в качестве датчика внешней информации для коррекции бесплатформенной инерциальной навигационной системой (БИНС), управления движением в вертикальной плоскости и в корреляционно-экстремальной навигационной системе (КЭНС) по рельефу местности.

В основу измерения составляющих вектора скорости летательного аппарата положен корреляционный метод, который базируется на вычислении и оценке параметров взаимных корреляционных функций (ВКФ) сигналов, рассеянных подстилающей поверхностью и принятых на три при-

емных антенны, расположенных в плоскости ОХZ связанных осей ЛА [1] с расстоянием между фазовыми центрами, не превышающим интервал пространственной корреляции отраженного сигнала.

На рис. 1 изображена антенная система КРИ, которая содержит две приемных антенны (в точках A и B) и одну приемопередающую (в точке O). Пространственные параметры X_0 и Z_0 рассчитывались, исходя из заданных диапазонов измеряемых составляющих вектора скорости и типов подстилающей поверхности.

В процессе отработки КРИ был произведен большой объем летных испытаний как в составе БКУ изделия, так и автономно на борту самолета ЯК-52. Для обеспечения возможности записи сигнала, отраженного от подстилающей поверхности, был разработан блок сохранения информации БСИ-1, выполнено его программно-аппаратное сопряжение с КРИ, обеспечивающее штатное

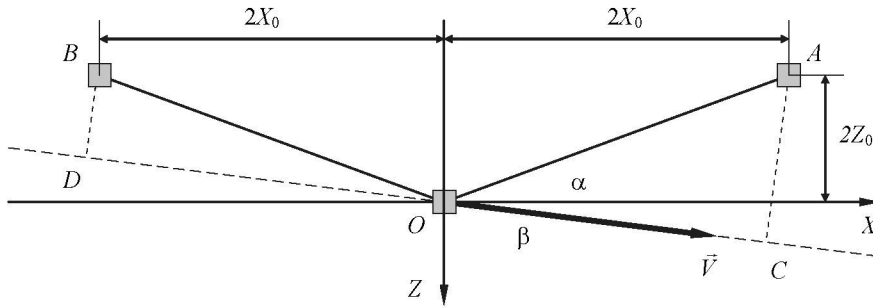


Рис. 1. Антенная система КРИ

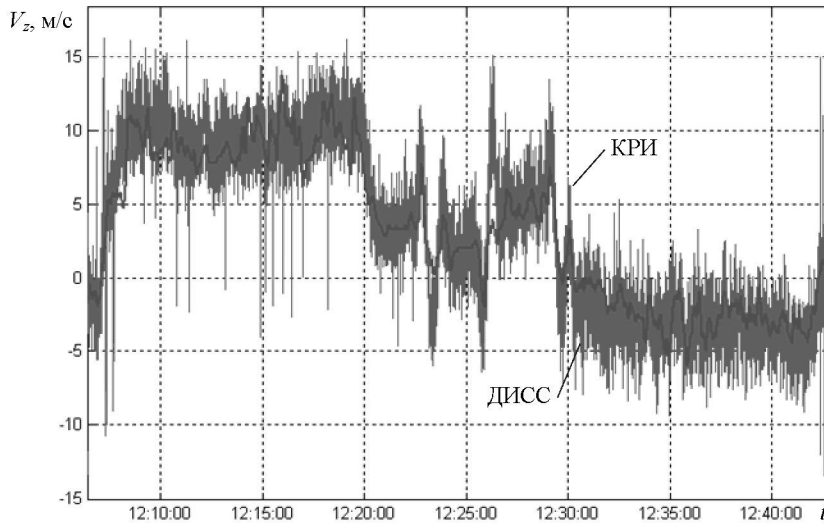


Рис. 2. Результат измерения поперечной составляющей скорости

функционирование прибора в процессе летных испытаний. Созданная математическая модель позволила производить послеполетную обработку записанного сигнала и тем самым вырабатывать методы и алгоритмы обработки сигнала, направленные на повышение точностных характеристик КРИ. Подробное описание летной лаборатории на базе самолета ЯК-52 приведено в работе [2].

Для сравнения результатов измерения составляющих вектора скорости в составе летной лаборатории использовался доплеровский измеритель составляющих скорости ДИСС Д-005. Сопоставительный анализ работы КРИ и ДИСС показал, что скоростной канал КРИ имеет погрешности измерения не более, чем у ДИСС, а в некоторых случаях и менее (например, при кренах ЛА). На рис. 2 представлены результаты измерения поперечной составляющей скорости в одном из полетов.

Одним из факторов, влияющих на точность измерения составляющих вектора скорости, является положение сигнального stroba скоростного канала КРИ относительно зондирующего импульса, отраженного от подстилающей поверхности. С одной стороны, на максимуме импульса обеспечивается максимальная мощность флуктуаций сигнала. С другой – доплеровские флуктуации на срезе импульса имеют более широкий спектр, сигнал более информативен, и, следовательно, такое

положение сигнального stroba является предпочтительным. В то же время при полете над поверхностями с узкой диаграммой обратного рассеяния (ДОР) отраженный импульс обужается, и сигнальный stroba может попасть в малоинформативную область с недопустимо малым отношением сигнал/шум, что приведет к снятию исправности скоростного канала КРИ.

Для решения этой проблемы был разработан алгоритм автоматической подстройки положения сигнального stroba скоростного канала методом «вилки», проиллюстрированный на рис. 3. Данный алгоритм был опробован в процессе летных испытаний как на самолете ЯК-52, так и в составе БКУ, и доказал свою эффективность.

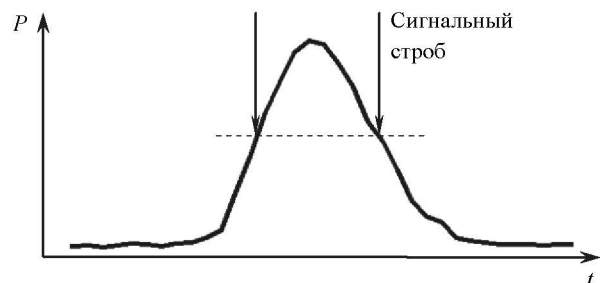


Рис. 3. Положение сигнального stroba скоростного канала КРИ

Изначально для оценки положения максимумов ВКФ сигналов, принятых на разнесенные антенны, в программном обеспечении (ПО) КРИ была реализована квадратичная аппроксимация ВКФ. По результатам послеполетной обработки сигналов, записанных блоком сохранения информации БСИ-1, с целью уменьшения погрешностей измерения составляющих вектора скорости был выработан наиболее оптимальный вид аппроксимирующей функции, в лучшей степени повторяющей форму ВКФ и слабо зависящей от искажения формы ВКФ. Это квадратичная аппроксимация логарифма ВКФ с треугольной весовой функцией.

Традиционный подход к измерению проекций вектора путевой скорости заключается в измерении транспортных запаздываний между сигналами, принятыми на три разнесенные антенны. Это обусловлено простым видом получаемых выражений. В случае антенной системы КРИ (см. рис. 1) они имеют вид:

$$V_x = \frac{\tau'_{\text{макс } 12} + \tau'_{\text{макс } 23}}{X_0} \times \frac{2}{\left(\frac{\tau'_{\text{макс } 12} + \tau'_{\text{макс } 23}}{X_0}\right)^2 + \left(\frac{\tau'_{\text{макс } 23} - \tau'_{\text{макс } 12}}{Z_0}\right)^2};$$

$$V_z = \frac{\tau'_{\text{макс } 23} - \tau'_{\text{макс } 12}}{Z_0} \times \frac{2}{\left(\frac{\tau'_{\text{макс } 12} + \tau'_{\text{макс } 23}}{X_0}\right)^2 + \left(\frac{\tau'_{\text{макс } 23} - \tau'_{\text{макс } 12}}{Z_0}\right)^2},$$

где $\tau'_{\text{макс } 12}$ – транспортное запаздывание между сигналами, принятыми антеннами в точках А и О; $\tau'_{\text{макс } 23}$ – транспортное запаздывание между сигналами, принятыми антеннами в точках О и В.

Данный метод обеспечивает хорошую точность измерения продольной составляющей V_x вектора скорости. Однако влияние поверхности и разного рода декоррелирующих факторов могут в некоторых случаях приводить к повышенным погрешностям в измерении поперечной составляющей V_z вектора скорости.

На рис. 4 изображены взаимные корреляционные функции сигналов, принятых антенной системой КРИ при движении ЛА с углом сноса. В зависимости от значения угла сноса изменяются не только положения максимумов ВКФ, но и их величины.

Реализация метода измерения поперечной составляющей вектора скорости по разности максимумов ВКФ в ПО КРИ позволила уменьшить ошибки измерения в несколько раз.

В силу физических принципов, заложенных в основу построения КРИ, измерение составляющих вектора скорости производится относительно подстилающей поверхности. Очевидно, что движение подстилающей поверхности, в том числе и неявное, отражается на результатах измерения.

В публикации [3] описан механизм возникновения орбитального течения, вызванного круговыми движениями частиц воды при распространении волны по ее поверхности (рис. 5), и приведена эмпирически полученная зависимость скорости орбитального течения от скорости ветра у поверхности. Разработанная методика учета данной зави-

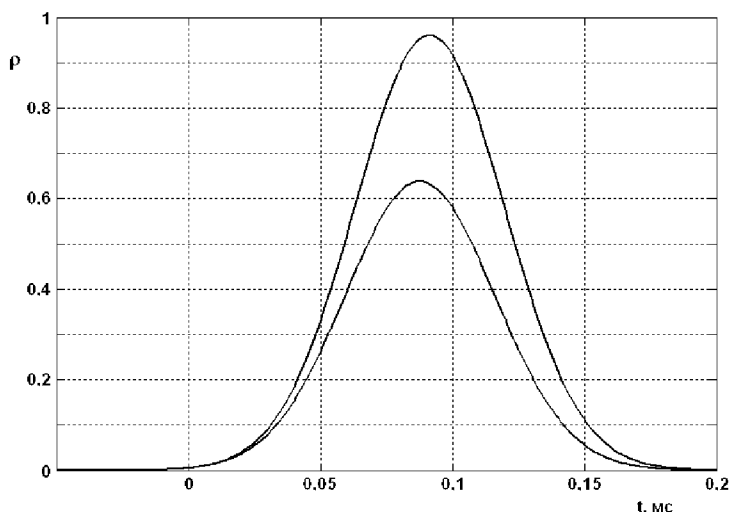


Рис. 4. ВКФ при движении ЛА с углом сноса

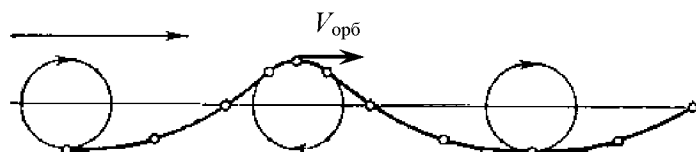


Рис. 5. Траектория отражающих частиц при волновом движении

симости при анализе результатов летных испытаний КРИ в составе БКУ позволила заметно уменьшить ошибки измерения составляющих вектора скорости.

Дальнейшее повышение точности определения местоположения ЛА обусловлено наличием в КРИ оценок как задержки, так и интенсивности отраженного сигнала и пространственной корреляции их флюктуаций, получаемых в процессе вычисления составляющих скорости. Это позволит формировать оценки двух полей – рельефа и радиояркостности и обнаруживать так называемые линейные ориентиры – дорожную и речную сеть, железнодорожное полотно, переходы вода/суша и т. п.

Реализация этих алгоритмов в КРИ с использованием имеющихся резервов повышения производительности вычислителя позволит существенно повысить точность коррекции и соответствует установившейся мировой тенденции построения БКУ.

Литература

1. Боркус, М.К. Корреляционные измерители путевой скорости и угла сноса летательных аппаратов / М.К. Боркус, А.Е. Черный. – М.: Сов. радио, 1973. – 169 с.

2. Использование реального сигнала для анализа природы погрешностей скоростного канала комбинированного радиотехнического измерителя (КРИ) / В.И. Вербицкий, Н.Н. Калмыков, С.А. Мельников, В.В. Соловьев // II Всерос. науч.-техн. конф. «Радиовысотометрия-2007»: сб. тр. – Каменск-Уральский: ОАО «УПКБ «Деталь», 2007. – С. 83.

3. Колчинский, В.Е. Автономные доплеровские устройства и системы навигации летательных аппаратов / В.Е. Колчинский, И.А. Мандуровский, М.И. Константиновский; под ред. В.Е. Колчинского. – М.: Сов. радио, 1975. – 432 с.

Поступила в редакцию 12 октября 2010 г.

Пономарев Леонид Иванович – генеральный директор – главный конструктор ОАО «УПКБ «Деталь», г. Каменск-Уральский; upkb@nexcom.ru

Калмыков Николай Николаевич – начальник научно-исследовательского отделения ОАО «УПКБ «Деталь», г. Каменск-Уральский; upkb@nexcom.ru

Кац Марк Израилевич – начальник конструкторского бюро ОАО «ОКБ «Новатор», г. Екатеринбург; main@okb-novator.ru

Иванов Юрий Александрович – ведущий инженер ОАО «ОКБ «Новатор», г. Екатеринбург; main@okb-novator.ru

Важенин Владимир Григорьевич – канд. техн. наук, доцент УГТУ–УПИ, г. Екатеринбург; site@mail.ustu.ru

Вербицкий Виталий Иванович – ведущий инженер ОАО «УПКБ «Деталь», г. Каменск-Уральский; upkb@nexcom.ru

Дядьков Николай Александрович – старший преподаватель УГТУ–УПИ, г. Екатеринбург; site@mail.ustu.ru

Мельников Сергей Александрович – ведущий инженер ОАО «УПКБ «Деталь», г. Каменск-Уральский; upkb@nexcom.ru

Ponomarev Leonid Ivanovich – director – chief designer of OSC «UDB «Detal», Kamensk-Uralskiy; upkb@nexcom.ru

Kalmykov Nikolay Nikolaevich – head of the research department of OSC «UDB «Detal», Kamensk-Uralskiy; upkb@nexcom.ru

Kats Mark Izrailevich – head of design bureau of OSC «EDB «Novator», Yekaterinburg; main@okb-novator.ru

Ivanov Yuri Aleksandrovich – principal engineer of OSC «EDB «Novator», Yekaterinburg; main@okb-novator.ru

Vazhenin Vladimir Grigorievich – PhD, assistant professor of USTU–UPI, Yekaterinburg; site@mail.ustu.ru

Verbitsky Vitaliy Ivanovich – principal engineer of OSC «UDB «Detal», Kamensk-Uralskiy; upkb@nexcom.ru

Dyadkov Nikolay Aleksandrovich – senior lecturer of USTU–UPI, Yekaterinburg; site@mail.ustu.ru

Melnikov Sergey Aleksandrovich – principal engineer of OSC «UDB «Detal», Kamensk-Uralskiy; upkb@nexcom.ru