



## ВЫЧИСЛЕНИЕ СОСТАВЛЯЮЩИХ СКОРОСТИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С ПОМОЩЬЮ ДОПЛЕРОВСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ

С.В. Каразеев, А.В. Комиссаров, С.К. Киселев, Р.Р. Валитов (УлГТУ),  
О.В. Урлапов (АО «УКБП»)

Рассматривается доплеровский измеритель с антенной четырехлучевой конструкции для применения в летательных аппаратах типа вертолет. Представлен алгоритм вычисления составляющих скорости летательного аппарата с помощью доплеровского измерителя. Фильтрация данных для оценки составляющих вектора скорости произведена с помощью алгоритма калмановской фильтрации. Приведены отношения средних значений погрешностей скорости к средним значениям допусков погрешностей на участке, согласно разработанному алгоритму. Описаны основные факторы, влияющие на погрешность вычисления составляющих скорости летательного аппарата типа вертолет с использованием доплеровского измерителя.

Ключевые слова: эффект Доплера, доплеровский измеритель скорости и угла сноса, фильтр Калмана.

Доплеровские измерители скорости и угла сноса (ДИСС) разработаны и используются достаточно давно [1]. Основное предназначение ДИСС — измерение продольной, поперечной и вертикальной составляющих вектора путевой скорости, а также угла сноса. Существует условное разделение на вертолетные и самолетные ДИСС. Вертолетные измерители по сравнению с самолетными, сложнее в реализации. Сложность заключается в том, что необходимо вычислять близкую к нулю доплеровскую частоту, учитывая ее знак, так как вертолет имеет несколько осей движения, в отличие от самолета. Важной особенностью вертолетных ДИСС является то, что необходимо использовать четырехлучевую конструкцию антенны, в отличие от самолетного, где возможно использование и двухлучевой антенны. Четырехлучевая антенна позволяет повысить точность и снизить погрешность измерений скорости, при измерении по нескольким осям, используя доплеровскую частоту каждого луча [2].

В настоящей статье рассматривается алгоритм вычисления составляющих вектора скорости. На рис. 1 представлена геометрия распространения узконаправленных лучей антенн (четырехлучевая конструкция) измерителя скорости, поясняющая принцип его работы.

Для реализации алгоритма необходимы следующие параметры:

- матрицы коэффициентов  $[L]_{123}^{-1}, [L]_{124}^{-1}, [L]_{134}^{-1}, [L]_{234}^{-1}$ ;
- длина волны  $\lambda$ ;
- информация о номере «плохого» луча (bad\_beam);
- массив частот Доплера (Fdp [1]).

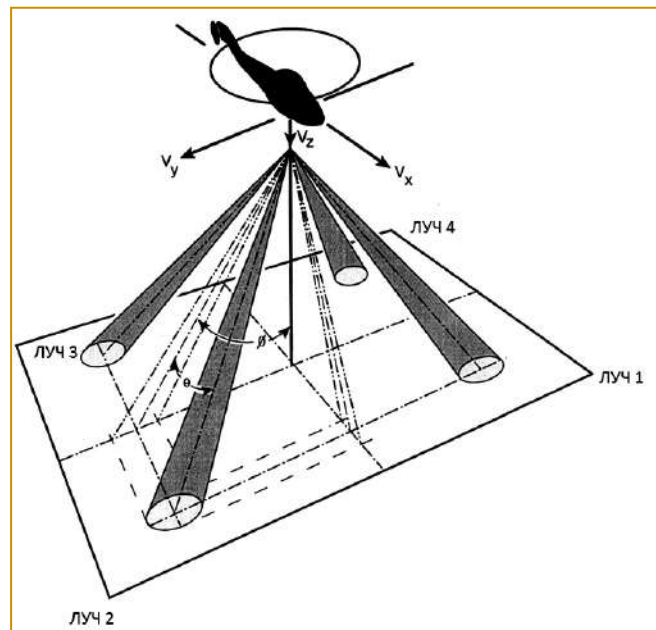


Рис. 1. Геометрия лучей блока (направление оси  $V_z$  — вверх)

Геометрия лучей блока проекции вектора скорости на направления лучей (рис. 1) описывается формулой (1):

$$V_i = L_{ix}V_x + L_{iy}V_y + L_{iz}V_z, \quad (1)$$

где  $i$  — номер  $i$ -го луча,  $L_{ix}$  — проекция  $i$ -го луча на ось  $X$ ,  $L_{iy}$  — проекция  $i$ -го луча на ось  $Y$ ,  $L_{iz}$  — проекция  $i$ -го луча на ось  $Z$ . Проекции векторов направ-

лений лучей на оси координат вычисляются исходя из данных об углах антенны, и в общем случае соответствуют формулам:

$$L_{ix} = \sin\theta_i; L_{iy} = \cos\theta_i \sin\varphi_i; L_{iz} = \cos\theta_i \cos\varphi_i. \quad (2)$$

Если учесть, что углы  $\theta_i$  и  $\varphi_i$  принимают положительные значения, а также прямую пропорциональность частоты Доплера и скорости:

$$V_i = \frac{1}{2} \lambda f_i, \text{ где } \lambda = \frac{c}{f} \quad (3)$$

где  $c = 299792458$  м/с — скорость света,  $f = 13325$  МГц — несущая частота,  $f_i$  — частота Доплера,

то выражение (1) можно переписать в матричном виде:

$$\lambda \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_{1x} & -L_{1y} & L_{1z} \\ L_{2x} & L_{2y} & L_{2z} \\ -L_{3x} & L_{3y} & L_{3z} \\ -L_{4x} & -L_{4y} & L_{4z} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Матричное уравнение (4) отражает зависимость скорости летательного аппарата (ЛА) в связанной системе координат (ССК) от частоты Доплера отраженного сигнала по четырем лучам [3].

Введя следующие обозначения:

$$[L]_{123} = \begin{pmatrix} L_{1x} & -L_{1y} & L_{1z} \\ L_{2x} & L_{2y} & L_{2z} \\ -L_{3x} & L_{3y} & L_{3z} \end{pmatrix}, [L]_{124} = \begin{pmatrix} L_{1x} & -L_{1y} & L_{1z} \\ L_{2x} & L_{2y} & L_{2z} \\ -L_{4x} & -L_{4y} & L_{4z} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

$$[L]_{134} = \begin{pmatrix} L_{1x} & -L_{1y} & L_{1z} \\ -L_{3x} & L_{3y} & L_{3z} \\ -L_{4x} & -L_{4y} & L_{4z} \end{pmatrix}, [L]_{234} = \begin{pmatrix} L_{2x} & L_{2y} & L_{2z} \\ -L_{3x} & L_{3y} & L_{3z} \\ -L_{4x} & -L_{4y} & L_{4z} \end{pmatrix},$$

выражение (4) можно переписать в четырех вариантах:

$$\lambda \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{pmatrix} = [L]_{123} \times \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix}, \lambda \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_4 \end{pmatrix} = [L]_{124} \times \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix}, \quad (6)$$

$$\lambda \begin{pmatrix} f_1 \\ f_3 \\ f_4 \end{pmatrix} = [L]_{134} \times \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix}, \lambda \begin{pmatrix} f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{pmatrix} = [L]_{234} \times \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix}.$$

Для измерения вектора скорости достаточно трех лучей, не лежащих в одной плоскости. Составляющие  $V_x, V_y, V_z$  вектора скорости ЛА в ССК можно вычислить по одной из четырех формул (6).

Ниже приведены формулы для восстановления значения частоты Доплера по трем другим лучам (для критерия «восстановленного» луча в алгоритме «захват-слежение»):

$$[KL_1] = (K_{11} \ K_{12} \ K_{13}) = (L_{1x} \ -L_{1y} \ L_{1z}) \times [L]_{234}^{-1};$$

$$[KL_2] = (K_{21} \ K_{22} \ K_{23}) = (L_{2x} \ L_{2y} \ L_{2z}) \times [L]_{134}^{-1}; \quad (7)$$

$$[KL_3] = (K_{31} \ K_{32} \ K_{33}) = (-L_{3x} \ L_{3y} \ L_{3z}) \times [L]_{124}^{-1};$$

$$[KL_4] = (K_{41} \ K_{42} \ K_{43}) = (-L_{4x} \ -L_{4y} \ L_{4z}) \times [L]_{123}^{-1};$$

$$f_{1\text{восст.}} = [KL_1] \times \begin{pmatrix} f_{2\text{изм.}} \\ f_{3\text{изм.}} \\ f_{4\text{изм.}} \end{pmatrix}; f_{2\text{восст.}} = [KL_2] \times \begin{pmatrix} f_{1\text{изм.}} \\ f_{3\text{изм.}} \\ f_{4\text{изм.}} \end{pmatrix};$$

$$f_{3\text{восст.}} = [KL_3] \times \begin{pmatrix} f_{1\text{изм.}} \\ f_{2\text{изм.}} \\ f_{4\text{изм.}} \end{pmatrix}; f_{4\text{восст.}} = [KL_4] \times \begin{pmatrix} f_{1\text{изм.}} \\ f_{2\text{изм.}} \\ f_{3\text{изм.}} \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Матрицы коэффициентов вычисляются на этапе инициализации, исходя из заданных углов антенны. Углы антенны являются измеряемой величиной, полученной на этапе настройки антенны и СВЧ блока [1].

Константа  $\lambda$  объявлена, а «плохой» луч и Fdp [1] являются результатом работы алгоритма «захват-слежение».

Алгоритм вычислений доплеровского измерителя скорости, следующий: в зависимости от номера луча, не участвующего в расчете («плохого» луча), выбирается один из четырех вариантов, составляющих вектора скорости, согласно выражениям (7) и (8). Полученные значения имеют в своем составе высокий уровень шумов, поэтому вычисленные значения  $V_x, V_y, V_z$  подвергаются линейной фильтрации по Калману [5].

Реализация калмановской фильтрации была проведена в среде Matlab. Результат ее применения на рис. 2.

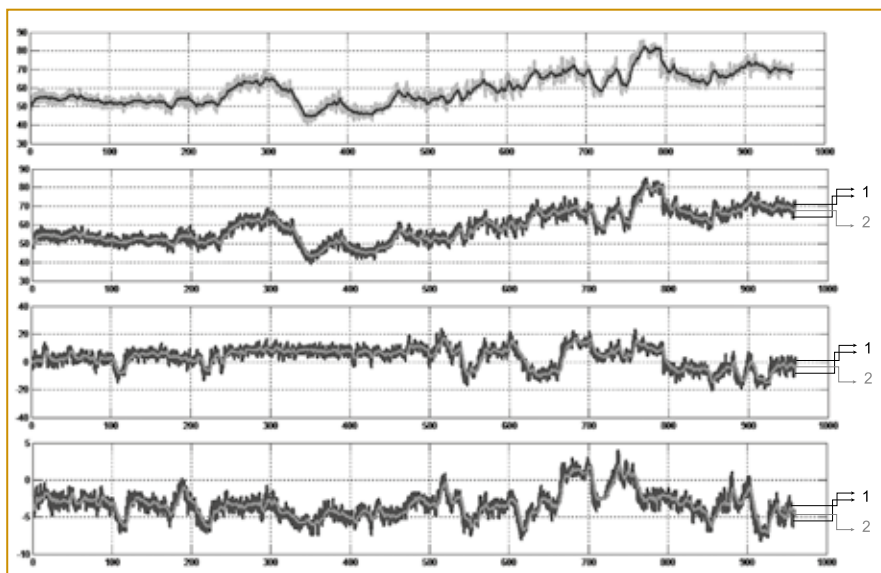


Рис.2. Пример работы алгоритма вычисления составляющих вектора скорости (1 – результат вычислений до фильтрации по Калману, 2 – после фильтрации по Калману)

**Оценка погрешностей доплеровского измерителя скорости**

Значительные погрешности обусловлены изменением характеристик поверхности Земли во время полета вертолета. Примером может служить — поверхность озера или моря в штиль. На ровной, практически идеальной поверхности не работает эффект Доплера, это связано с тем, что с увеличением угла падения начинает преобладать эффект зеркального отражения волны, при котором энергия падающей волны отражается в сторону от приемной антенны вертолета. При полете над сушей, полученные доплеровские частоты в зависимости от типа поверхности изменяются в пределах 0,08...0,65% [6]. Обычно при полете над сушей вводят аппаратную среднюю поправку 0,37%, что учитывается в разработанном алгоритме. В ДИСС предусматривается ручное изменение величины поправки включением режима «суша—море» [3]. Также возможна полная потеря отраженного сигнала ДИСС, при маневрах вертолета, превышающих требований к ДИСС по крену и тангажу. Это приводит к распространению лучей антенны ДИСС, параллельно плоскости земли, что увеличивает наклонную дальность и углы падения лучей, что искажает результаты измерений [7].

Инструментальные погрешности, связанные с антенным, передающим и приемным устройствами и их влияние на ДИСС широко описаны в литературе. Также при производстве ДИСС проводится множество калибровок и настроек с использованием наземных систем контроля, где устраняются и существенно уменьшаются основные инструментальные погрешности [7].

Отношения средних значений погрешностей скорости  $mW_x$  к средним значениям допусков погрешностей на участке полета  $\Delta W_x$ , согласно разработанному алгоритму, составляют:

$$\begin{aligned} -0,23 < mW_x/\Delta W_x < 2,1; \\ -6,22 < mW_z/\Delta W_z < 5,48; \\ -3,56 < mW_y/\Delta W_y < -0,12. \end{aligned}$$

Разработанный алгоритм доплеровского измерителя скорости и угла сноса обеспечивает измерение скорости по трем осям с разными знаками, угла сноса, в широком диапазоне высот и собственных скоростей вертолета.

**Список литературы**

1. *Валитов Р.Р., Киселев С.К.* Измерение основных характеристик фазированной антенной решетки для доплеровского измерителя составляющих скорости авиационного применения // Известия самарского научного центра российской академии наук. 2018. Т. 20. № 4 (3), 356 с.
2. *Васильев В.Г., Кречетов А.Д.* Доплеровский измеритель скорости и угла сноса. Составители: Ленинградский институт авиационного приборостроения, 1988, 16 с.
3. *Колчинский В.Е., Мандуровский И.А.* Константиновский М.И. Автономные доплеровские устройства и системы навигации летательных аппаратов. — М. «Сов. Радио», 1975, 432 с.
4. Техническое описание ДИСС 7. Кн.1, ред ГМ 641.007 ТО 1972г.стр.10,41. 54-56.
5. *Dybedal J.* Doppler Radar Speed Measurement Based On A 24 GHz Radar Sensor, 2013.
6. *Long Li, Yang Ju, Xuefeng Yan, Yong Zhou.* An Adaptive Kalman Filtering Algorithm based on Doppler Frequency, 2015.
7. *Meller M.* Efficient Signal Processing Algorithms for Passive Radars. S&T Organization, 2012.

**Каразеев Сергей Владимирович** — аспирант УлГТУ,

**Комиссаров Александр Владимирович** — аспирант УлГТУ,

**Киселев Сергей Константинович** — д-р техн. наук, заведующий кафедрой

«информационно-вычислительные комплексы» УлГТУ,

**Валитов Рафаэль Рафикович** — аспирант УлГТУ, инженер АО «УКБП»,

**Урланов Олег Владимирович** — канд. техн. наук, главный специалист АО «УКБП».

**Линейка компьютеров AdvantiX на базе процессоров «Эльбрус» пополнилась тремя моделями для АРМ**

Компания Advantix расширила линейку компьютеров на базе ЦПУ архитектуры «Эльбрус» новыми решениями. В дополнение к семейству компьютеров «Брусника» в промышленном исполнении Advantix предлагает модели компьютеров офисного исполнения для оснащения АРМ для работы в составе информационных систем с доверенной инфраструктурой.

АРМ начального уровня AdvantiX ВН-ЭЛ1С создано на базе экономичного одноядерного процессора общего назначения «Эльбрус-1С+» (1891ВМ11Я) с тактовой частотой до 1000 МГц и интегрированным ускорителем с поддержкой 3D-графики. Система обеспечивает вывод изображения высокой четкости на два монитора с разрешением Full HD 1920x1080 или на монитор с разрешением Quad HD 2560x1440. В компьютер по умолчанию устанавливается 8 ГБ оперативной памяти DDR3-1600 ECC (с возможностью расширения до 16 ГБ) и жесткий диск объемом 1 ТБ HDD. Набор интерфейсов включает сетевой порт Ethernet, 2xUSB 2.0 на передней панели, 4xUSB 2.0 на задней панели. При необходимости компьютер может быть укомплектован монитором, клавиатурой и мышью. Это решение идеально подойдет как доверенное рабочее место оператора, сочетающее в себе оптимальную стоимость и хорошие возможности расширения.

Рабочие места операторов среднего уровня ВН-ЭЛ8С/АРМ и ВН-ЭЛ8С/АРМ-М поставляются с новым высокопроизводительным восьмиядерным процессором архитектуры Эльбрус 1891ВМ028 с тактовой частотой до 1300 МГц. Оба АРМ оснащаются дискретной видеокартой ASUS ATI R7 240-2GD5-L, установленной в слот PCI Express 2.0 формата x16. В модели ВН-ЭЛ8С/АРМ-М доступен еще слот формата M.2 USB для установки модуля аппаратной доверенной загрузки. В устройство по умолчанию устанавливается 16 ГБ оперативной памяти DDR3-1600 ECC (с возможностью расширения до 32 ГБ), жесткий диск объемом 1 ТБ HDD. Компьютер ВН-ЭЛ8С/АРМ использует оперативную память 16 ГБ (с возможностью расширения до 64 ГБ), 1 ТБ HDD и имеет более широкий выбор слотов расширения: два слота PCI Express 2.0 x16 (один занят дискретной видеокартой), слот PCI Express 2.0 x4, а также слот PCI 2.0 на 32 бита. Из интерфейсов доступны 4 x USB 2.0 на передней панели, 6 x USB 2.0 на задней панели, видеовыходы HDMI и DVI, последовательный RS-232 (DB-9), три сетевых порта LAN (RJ45), пять аудиовыходов. Оба устройства укомплектованы клавиатурой, мышью, а также 21,5" монитором и полностью готовы для оснащения высокопроизводительных доверенных АРМ.

[Http://www.advantix-pc.ru](http://www.advantix-pc.ru)