

УДК 621.396.96: 551.508.855

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАДИОЛОКАЦИОННОГО КАНАЛА ИЗМЕРЕНИЯ ВЕКТОРА СКОРОСТИ ОПАСНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В БЛИЖНЕЙ АЭРОДРОМНОЙ ЗОНЕ

А. Н. Детков¹, И. А. Сеницын¹, А. А. Безуглов²

¹ОАО «Бортовые аэронавигационные системы»

127015, г. Москва, ул. Большая Новодмитровская, д. 12, стр. 15

²Государственный лётно-испытательный центр им. В.П. Чкалова
416510, Ахтубинск, Астраханская область

Статья поступила в редакцию 19 сентября 2017 г.

Аннотация. В рамках цифро-натурного метода оценки характеристик доплеровских метеорологических радиолокационных комплексов ближней аэродромной зоны предложена имитационная модель радиолокационного канала измерения вектора скорости метеообразования. Приведены результаты модельного эксперимента по оценке точности определения параметров доплеровских скоростей опасных метеорологических явлений.

Ключевые слова: доплеровская радиолокационная станция ближней аэродромной зоны; сдвиг ветра; 3D радиолокационные изображения; радиальная скорость; ширина спектра радиальной скорости; математическая модель.

Abstract. Increasing of the efficiency of creating equipment for promising and modernized models of meteorological Doppler radar systems (MDRS) requires extensive involvement of modeling methods in field experiments in order to obtain results from a minimum amount of experimental data in a limited time. Therefore, a mathematical model of the radar channel for measuring the velocity vector has been developed within the digital-natural method for estimating the characteristics of the MDRS. It includes: a meteorological formation model; a model of signals at the filter outputs of the sum and difference directional pattern of antenna system; an angular

measurement model. Using the simulation method, the characteristics of the radar channel for measuring the velocity of meteorological formation have been studied and the accuracy of determining the Doppler velocities of dangerous meteorological phenomena has been estimated. It is shown that the main influence on the magnitude of errors in measuring the velocity vector of meteorological formation in the channel under consideration is rendered by noise components: internal noises of the receiving device and random (chaotic) motion of particles forming a reflecting cloud. To ensure the required accuracy of the measurements, it is necessary to use an adaptive servo system that unfolds the zeroth planes of the beam until the difference in signal intensity in the horizontal and vertical channels becomes maximum. In this case, measurement in a channel with large amplitude of the signal gives the magnitude of the velocity vector, and the angle of rotation of the beam will determine the direction of motion of meteorological phenomena in the picture plane. An estimate of the radial velocity component is performed by the radar channel with high accuracy even for small values of the signal-to-noise ratio and with a relatively high intensity of the chaotic component of the meteorological movement.

Keywords: near-airfield Doppler radar; wind shear; 3D radar images; radial velocity; width of the radial velocity spectrum; simulation model.

1. Введение

Сдвиг ветра на малых высотах считается одним из опаснейших и коварных для авиации явлений погоды [1-5]. Первоочередной задачей, направленной на повышение безопасности полётов вблизи аэродрома, выполнения взлёта и посадки, является создание высокоинформативной автономной системы метеонавигационного обеспечения ближней аэродромной зоны.

К такой системам можно отнести, прежде всего, метеорологический радиолокационный комплекс (МРЛК) «Монокль-БЗ», который предназначен для сбора, обработки и оперативного предоставления информации о полях облачности, осадков и связанных с ними опасных метеорологических явлениях, интенсивности осадков, параметрах ветра и турбулентном состоянии

атмосферы, а также для создания радиолокационного метеорологического поля в ближней зоне аэродрома (в местах непосредственного базирования авиации), где нет возможности установки стационарного метеорологического радиолокатора типа ДМРЛ-С, ДМРЛ-10 или такая установка нецелесообразна [6].

МРЛК «Монокль-БЗ» позволяет получать 3D (трёхмерные) радиолокационные портреты радиальной скорости и ширины спектра радиальных скоростей метеообразований. Экспериментально полученные 3D скоростные портреты в виде пространственного распределения радиальной скорости и ширины спектра скоростей приведены на рис. 1 и 2 соответственно. Представленные 3D портреты позволяют визуально и наглядно определить распределение радиальной скорости метеообразований в условиях интенсивных осадков и смещения по высоте слоев воздушных масс,двигающихся с разной скоростью. В областях соприкосновения слоев, имеющих разную скорость, формируются зоны повышенной турбулентности. Отраженный радиосигнал от таких зон имеет увеличенную ширину спектра доплеровских частот [2].

Сложность современных МРЛК, средств обеспечивающих их экспериментальную отработку и связанные с этим трудности перестройки натуральных экспериментов в процессе их реализации делают необходимым проведение ряда мероприятий по повышению эффективности создания аппаратуры перспективных и модернизированных образцов МРЛК.

Одним из путей решения этой проблемы является широкое привлечение методов моделирования к натурным экспериментам с целью получения в ограниченное время результатов из минимального объёма экспериментальных данных. Такой подход можно назвать цифро-натурным методом оценки характеристик МРЛК ближней аэродромной зоны [7, 8]. Метод позволит сократить количество натуральных экспериментов, мест их проведения, а также повысить достоверность оценок и оправдываемость характеристик перспективных МРЛК.

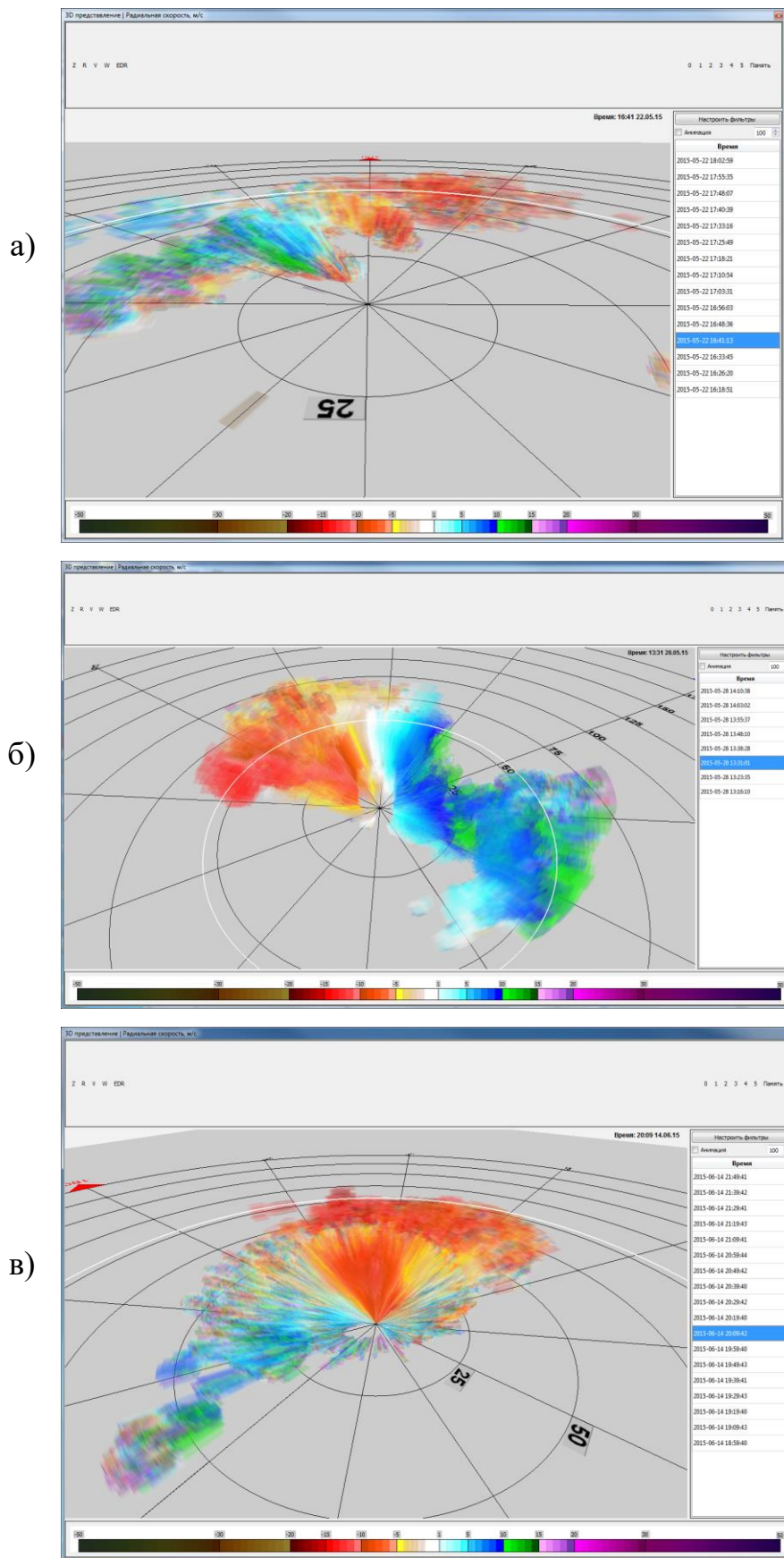


Рис. 1. Карта пространственного распределения радиальных скоростей метеообразований

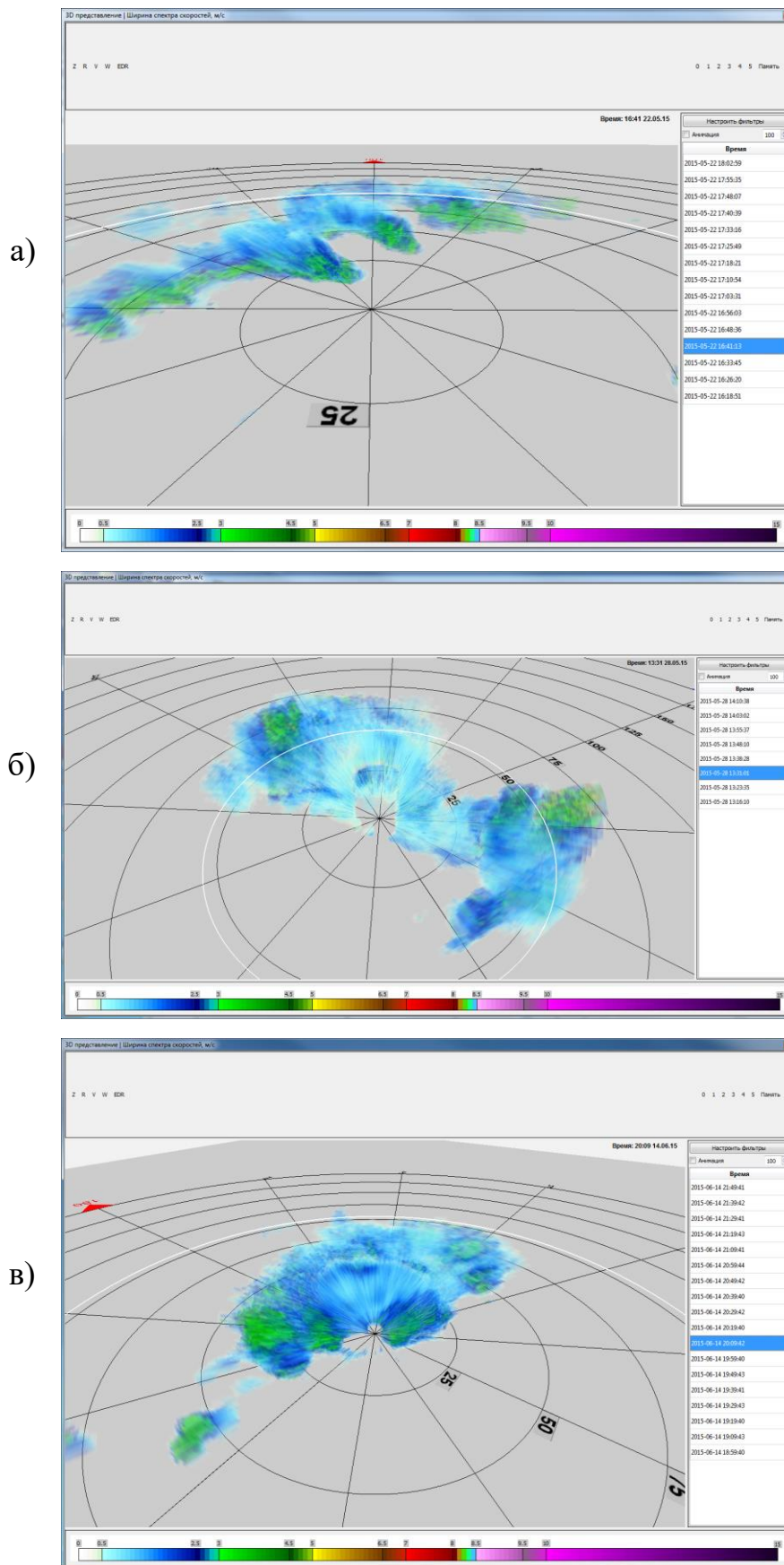


Рис. 2. Карта пространственного распределения ширины спектра радиальных скоростей метеорообразований

Цель работы – разработка в рамках цифро-натурного метода оценки характеристик МРЛК математической модели радиолокационного канала измерения вектора скорости и оценка точности определения параметров доплеровских скоростей опасных метеорологических явлений.

2. Модель радиолокационного канала измерения вектора скорости ламинарного воздушного потока

Наземный МРЛК является когерентной импульсно-доплеровской станцией с моноимпульсной в двух плоскостях (горизонтальной и вертикальной) антенной. Обзор выполняется за счёт электромеханического сканирования полотном антенны (рис. 3).

Для оценки потенциальных характеристик такого МРЛК при наблюдении метеорологических объектов рассмотрим сначала задачу измерения полного вектора скорости взаимного движения МРЛК и отражающей поверхности полагая, что отражающий объём изотропен и может быть представлен плоскостью. На практике эта задача возникает при измерении скорости ламинарного потока ветра, не имеющего существенной турбулентной составляющей [9].

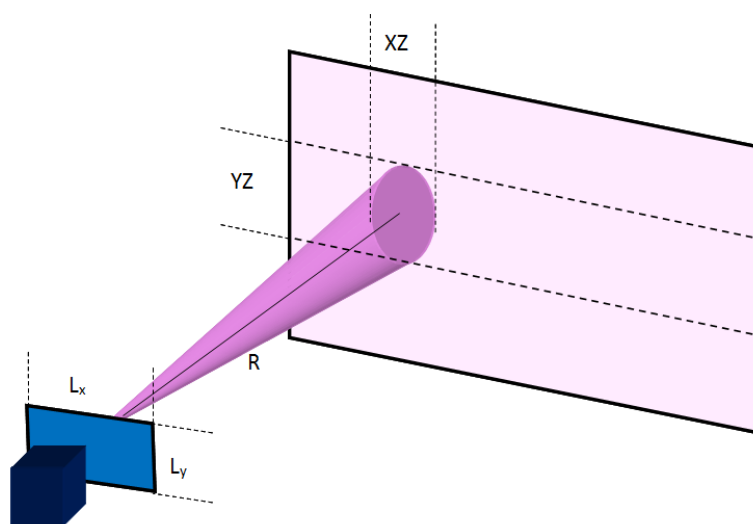


Рис. 3. Метод обзора в наземном МРЛК

Наиболее распространенным режимом при наблюдении метеообразований является измерение радиальной составляющей скорости их

движения за счёт оценки величины доплеровского сдвига частоты отраженного от разрешаемого объёма сигнала.

В данном случае исследуется режим, в котором применение совместно временной (частотной) и пространственной (за счёт направленных свойств антенны) обработки сигналов позволяет измерять полный вектор скорости движения метеообразования при излучении в пределах одного узкого луча диаграммы направленности антенны (ДНА).

Рассмотрим распределение величины доплеровского сдвига частоты отраженного от метеообразования сигнала в пространстве элемента разрешения размером $XZ \times YZ$. Для этого определим систему наблюдения, геометрия которой представлена на рис. 4.

Отражающая поверхность на рис. 4 выделена пунктирной линией. Свяжем с этой поверхностью ортогональную систему координат $(\zeta \ \xi \ \eta)$. Отражающая поверхность нормальна к направлению излучения РЛС и находится от неё на достаточно большом расстоянии R , так что её угловой размер невелик и для используемых соотношений применимо приближение дальней зоны. Каждая точка на поверхности с координатами $\mathbf{X} = (R \ x \ y)$ имеет одинаковый вектор скорости $\mathbf{V} = (v_R \ v_x \ v_y)$ неизменный за время наблюдения T_c , т.е. $\mathbf{V} = \text{const}(t, \mathbf{X})$.

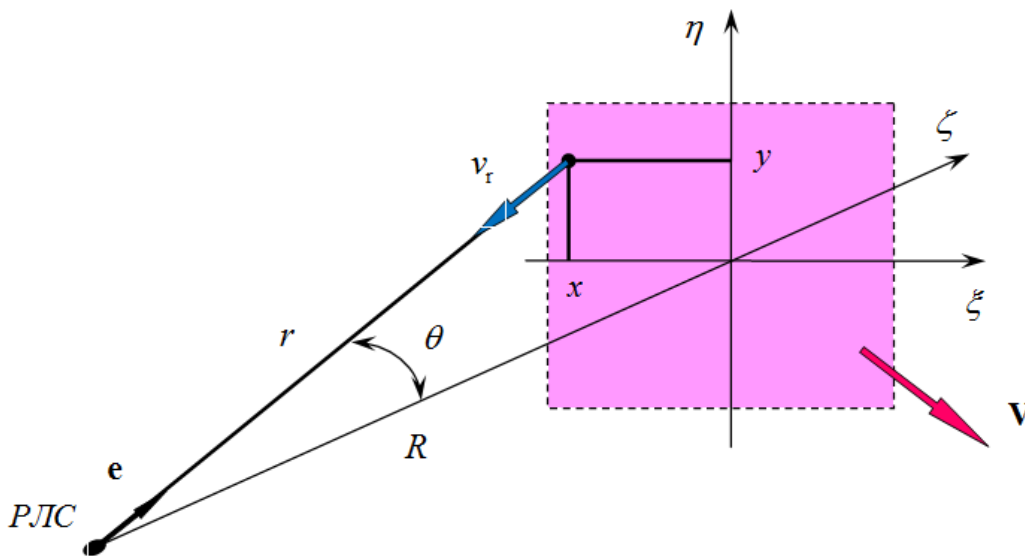


Рис. 4. Геометрия системы наблюдения

Направление РЛС – отражающая точка зададим осью $\mathbf{e} = (e_R \ e_x \ e_y)$, определенной направляющими косинусами

$$e_R = \frac{R}{r} = \cos \alpha_R, \quad e_x = \frac{x}{r} = \cos \alpha_x, \quad e_y = \frac{y}{r} = \cos \alpha_y, \quad r = \sqrt{R^2 + x^2 + y^2}.$$

Для расчёта пространственного распределения доплеровского сдвига частоты отраженного от поверхности сигнала $f_d(x, y)$ необходимо найти проекцию v_r вектора \mathbf{V} на ось \mathbf{e} и вычислить

$$f_d(x, y) = \frac{2v_r(x, y)}{\lambda}. \quad (1)$$

По определению проекция есть скалярное произведение векторов \mathbf{V} и \mathbf{e} :

$$v_r = (\mathbf{V}, \mathbf{e}) = \frac{1}{r} (v_R R + v_x x + v_y y). \quad (2)$$

Ниже приведены результаты расчетов значений $f_d(x, y)$ в соответствии с выражениями (1), (2) для некоторых вариантов параметров МРЛК и скорости движения поверхности. Расчёты выполнены для параметров МРЛК, приведённых в табл. 1.

Частота повторения F_p обеспечивает однозначную передачу спектра доплеровских частот отраженного от метеообразования сигнала, поэтому в дальнейшем рассматривается его комплексная огибающая.

Таблица 1

Параметры	Значения
λ – длина волны излучения, м	0,03
$L_x \times L_y$ – размер антенны, м	1×1
R – дальность до метеообразования, км	10
τ – длительность зондирующего импульса, мкс	1
F_p – период повторения, кГц	2...5
T_c – время накопления сигнала, с	0,5...1
$\theta_x \times \theta_y$ – ширина ДНА на уровне -3 дБ, градусов	$1,7 \times 1,7$
$XZ \times YZ$ – размер элемента разрешения, м	300×300

Каждое из рассчитанных пространственных распределений частоты представлено двумя графиками – линиями равных уровней и в 3D проекции. На рисунках приведена, также, величина максимального доплеровского сдвига частоты f_{\max} и ширина диапазона частот принимаемого сигнала $\Delta F = f_{\max} - f_{\min}$.

На рис. 5 показано пространственное распределение доплеровского сдвига частоты при встречном движении МРЛК и отражающей поверхности. Как видно, нормальная составляющая скорости движения v_R приводит к незначительному, в данном примере менее 0,2 Гц, изменению частоты в пределах отражающей плоскости. При увеличении v_R диапазон изменения частот ΔF пропорционально возрастает.

Пространственное распределение частот при наличии только горизонтальной составляющей движения v_x показано на рис. 6. Распределение имеет вид плоскости, угол наклона которой к оси y пропорционален величине v_x . Несмотря на то, что приведённая в примере величина v_x в два раза меньше, чем величина v_R в предыдущем примере, диапазон изменения скорости ΔF достигает 10 Гц, т.е. вид пространственного распределения частоты более чувствителен к составляющей скорости движения, нормальной к направлению облучения.

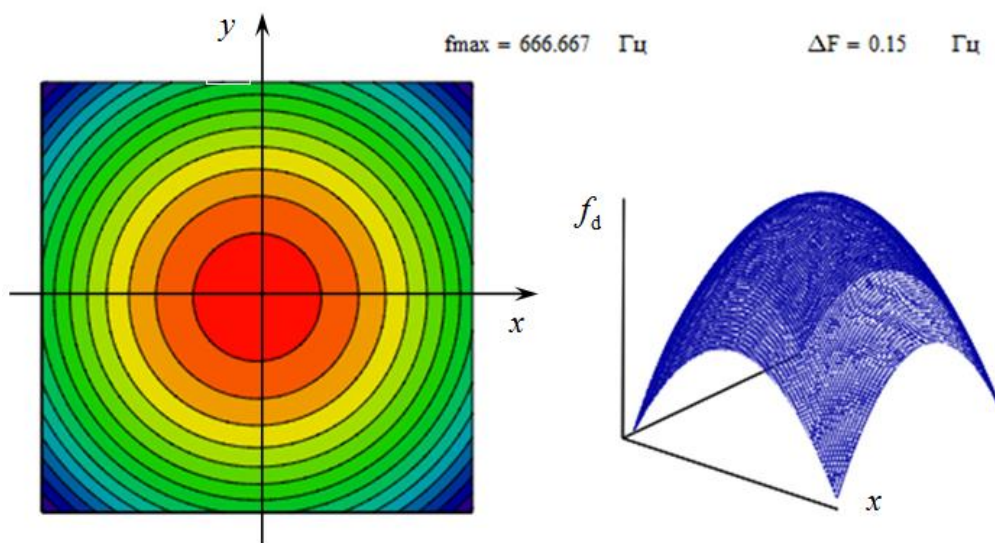


Рисунок 5 – Встречное движение: $v_R = 10$ м/с, $v_x = 0$ м/с, $v_y = 0$ м/с

Вертикальное движение плоскости (вдоль оси y) даёт ту же картину, что на рис. 5, только плоскость частотного распределения развернута на 90° , т.е. наклонена относительно оси y .

Пространственное распределение частоты при наличии всех трёх составляющих вектора движения показано на рис. 7. Оно имеет вид несколько искривленной поверхности, поднятой на оси частот на 1 кГц и наклонённую относительно осей x и y .

Таким образом, вид пространственного распределения частот состоит в том, что его вид чувствителен ко всем составляющим вектора скорости движения отражающей поверхности. Диапазон изменения частот составляет единицы и десятки герц при относительной скорости движения в единицы метров в секунду, что позволяет реализовать радиолокационное измерение полного вектора скорости при условии выполнении частотных измерений с точностью в единицы герц и угловых измерений с точностью в доли градуса.

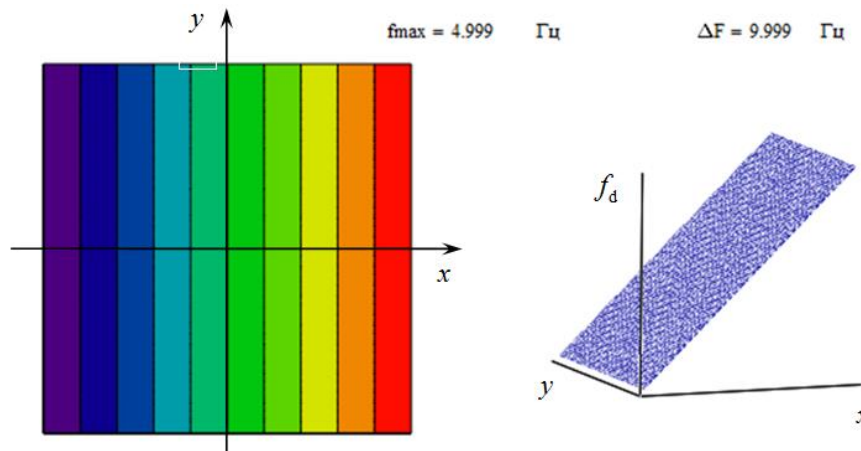


Рисунок 6 – Горизонтальное движение: $v_R = 0$ м/с, $v_x = 5$ м/с, $v_y = 0$ м/с

Один из возможных вариантов структуры радиолокационного канала при измерении полного вектора скорости движения поверхности представлен на рис. 8. Антенная система работает в моноимпульсном угломерном режиме и формирует три диаграммы направленности – суммарную и разностные в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Выходные сигналы от каждой из этих диаграмм направляются в три идентичных фильтровых системы из N фильтров каждая, осуществляющие разрешение принимаемых сигналов по

частоте. Ширина полосы пропускания каждого из фильтров определяется временем накопления сигнала $\Delta_f = 1/T_c$. Для каждой пары идентичных n -х фильтров в суммарном и разностных каналах вычисляется оценка углов прихода $\hat{\theta}_{nx}, \hat{\theta}_{ny}$ соответствующих этим фильтрам сигналов. За оценку частоты сигналов \hat{f}_n принимается центральная частота настройки соответствующих фильтров. Совокупность оценок $\hat{f}, \hat{\theta}_x, \hat{\theta}_y$ позволяет рассчитать значения вектора скорости \mathbf{V} .

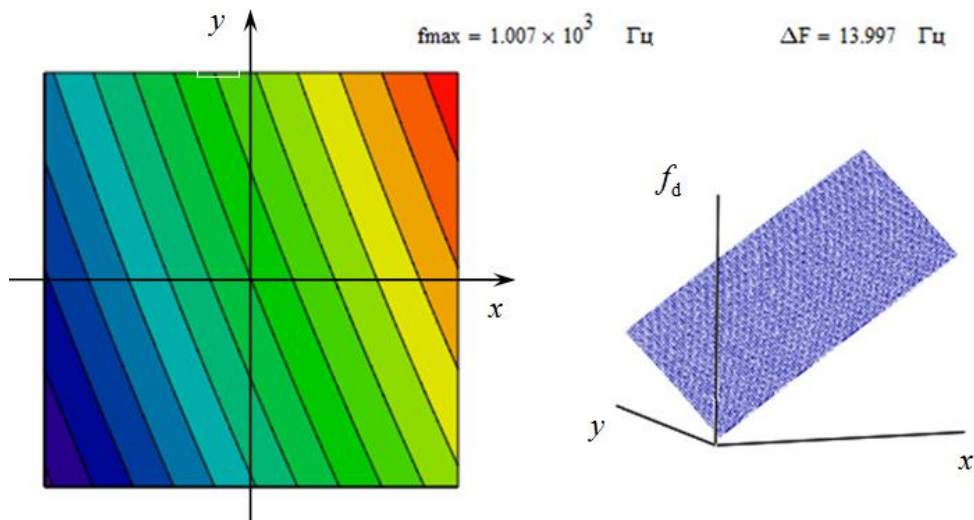


Рисунок 7 – Полный вектор движения: $v_R = 15$ м/с, $v_x = 5$ м/с, $v_y = 2$ м/с

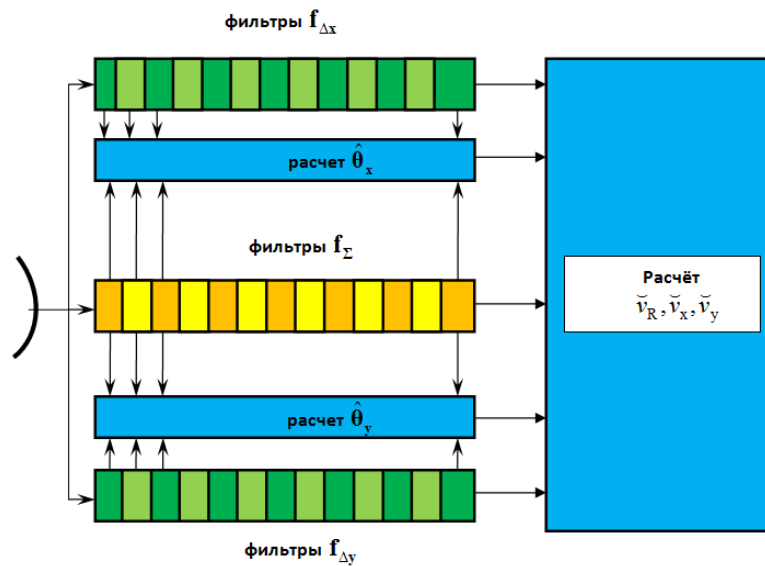


Рис. 8. Структура радиолокационного канала измерения вектора скорости метеообразования

В качестве примера рассмотрим алгоритм расчёта вектора \mathbf{V} в линейном приближении формы частотного распределения, когда кривизной скоростной поверхности можно пренебречь.

В принятой нами геометрии системы наблюдения для любого угла θ справедливо приближение $\sin \theta \cong \theta$, тогда $x/r = \theta_x$, $y/r = \theta_y$ и выражение (1) для доплеровского сдвига частоты отраженного от одной точки сигнала при условии (2) преобразуется к виду

$$f_d = \frac{2}{\lambda} (v_R + v_x \theta_x + v_y \theta_y).$$

В этих условиях получаемые радиолокационной системой оценки связаны с измеряемыми параметрами вектора скорости системой линейных уравнений

$$\hat{\mathbf{f}} = \frac{2}{\lambda} (\check{v}_R + \check{v}_x \hat{\theta}_x + \check{v}_y \hat{\theta}_y), \quad (3)$$

где символ $\check{}$ означает неизвестную (рассчитываемую) величину.

Введём обозначения

$$\check{f}_0 = \frac{2\check{v}_R}{\lambda}, \quad \check{k}_x = \frac{2\check{v}_x}{\lambda}, \quad \check{k}_y = \frac{2\check{v}_y}{\lambda},$$

где \check{f}_0 имеет смысл оценки сдвига частотной поверхности по оси f , а \check{k}_x, \check{k}_y – коэффициенты наклона прямых, образованных сечениями частотной поверхности угломерными плоскостями. Тогда система уравнений (3) становится более удобной для физической интерпретации:

$$\hat{\mathbf{f}} = \check{f}_0 + \check{k}_x \hat{\theta}_x + \check{k}_y \hat{\theta}_y. \quad (4)$$

Задача измерения вектора скорости сводится к задаче расчёта частотного сдвига \check{f}_0 и коэффициентов угла наклона \check{k}_x, \check{k}_y частотной поверхности.

В реальных условиях радиолокационного измерения оценки $\hat{\mathbf{f}}, \hat{\theta}_x, \hat{\theta}_y$ получаются с погрешностями и дают «облако» значений, которое может быть аппроксимировано плоскостью, например методом регрессионного линейного анализа по критерию минимума среднего квадрата ошибки.

Для иллюстрации возможности расчёта вектора скорости рассмотрим случай измерения, когда отсутствует вертикальная составляющая скорости – $v_y = 0$. Соответствующий вид скоростной поверхности представлен на рис. 6, а её сечение вертикальной угломерной плоскостью на рис. 9.

Звездочками отмечены полученные в угломерном канале с некоторой случайной ошибкой значения оценок $\hat{\theta}_y$. При таком двумерном векторе скорости выражение (4) преобразуется к системе уравнений

$$\hat{\mathbf{f}} = \check{f}_0 + \check{k}_y \hat{\theta}_y,$$

которая имеет решение вида

$$\check{k}_x = \frac{\left(\sum_n \hat{f}_n\right)^2 - N \sum_n \hat{f}_n^2}{\sum_n \hat{f}_n \sum_n \hat{\theta}_{nx} - N \sum_n \hat{f}_n \hat{\theta}_{nx}},$$

$$\check{f}_0 = -\frac{1}{N} \left(\check{k}_x \sum_n \hat{\theta}_{nx} - \sum_n \hat{f}_n \right).$$

Исходя из рассчитанных параметров частотной поверхности вычисляются значения вектора скорости:

$$\check{v}_R = \frac{\lambda \check{f}_0}{2}, \quad \check{v}_x = \frac{\lambda \check{k}_x}{2}.$$

Для оценки точностных характеристик модели радиолокационного канала рассмотрим измерение двух составляющих вектора скорости поверхности v_R , v_x в радиолокаторе, накапливающем сигнал в течение $T_c = 1$ с, что соответствует ширине полосы пропускания фильтра $\Delta_\phi = 1$ Гц. Пусть ширина ДНА на дальности $R = 10$ км обеспечивает зону наблюдения шириной $XZ = 300$ м (табл. 1). При истинных значениях составляющих вектора скорости $v_R = 5$ м/с, $v_x = 10$ м/с доплеровский сдвиг частоты для центральной точки поверхности $f_0 = 333$ Гц, ширина спектра сигнала $\Delta F = 20$ Гц. Следовательно, зона спектрального анализа перекрывается $N = 20$ фильтрами.

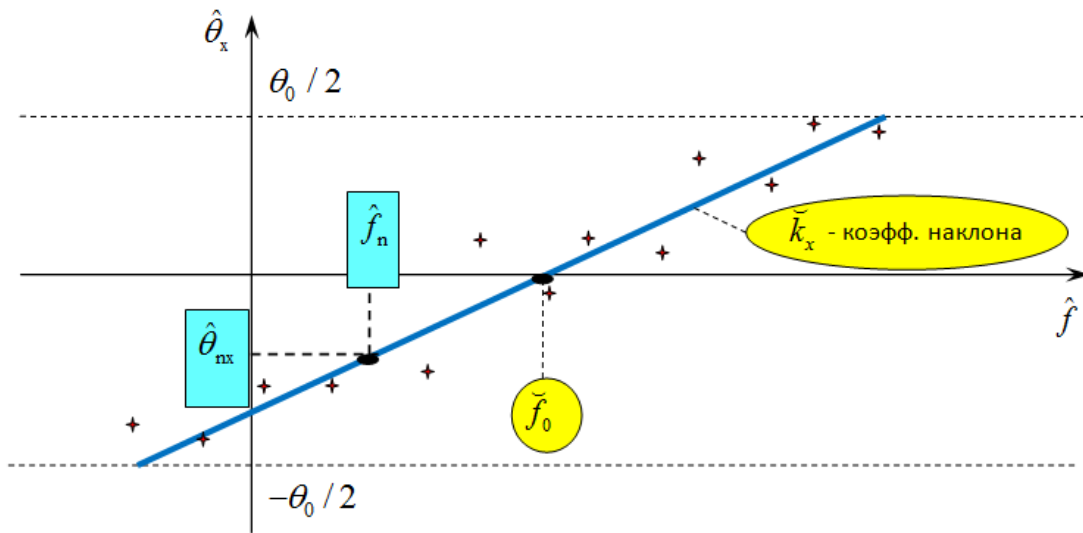


Рис. 9. Пространственное распределение частоты при $v_y = 0$.

На рис. 10 приведены зависимости измеренных значений v_R , v_x от точности измерения угла $\hat{\theta}_x$. Предполагается, что погрешности измерения $\hat{\theta}_x$ распределены по нормальному закону с нулевым средним и среднеквадратичным отклонением (СКО) равным σ_θ .

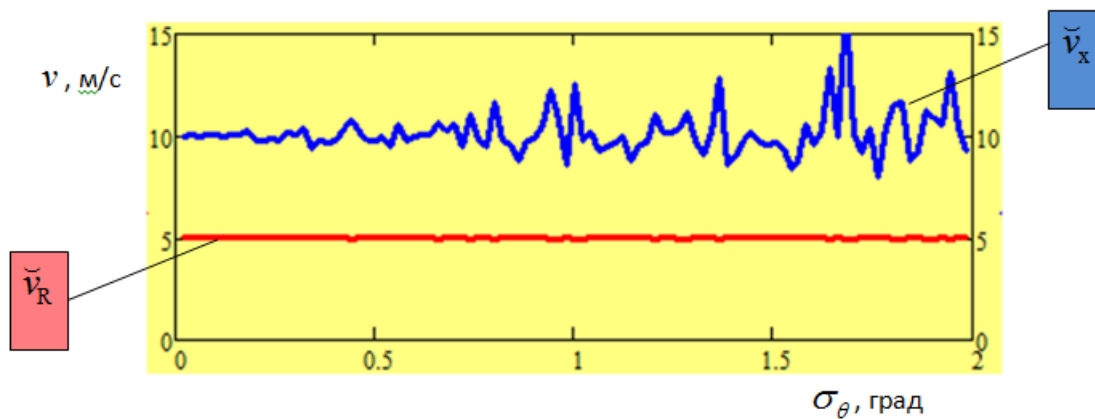


Рис. 10. Результаты моделирования измерений составляющих вектора скорости при $v_R = 5$ м/с, $v_x = 10$ м/с

Из рис. 10 видно, что в диапазоне рассматриваемых значений σ_θ погрешность измерения радиальной составляющей скорости v_R мала и практически не зависит от точности угловых измерений. Погрешность измерения тангенциальной составляющей скорости v_x возрастает при

увеличении погрешности измерения угла σ_θ , однако её величина вполне приемлема для метеорологических наблюдений.

Высокая точность измерений обусловлена тем, что система фактически выполняет N (по числу фильтров) измерений одного параметра, что приводит к уменьшению ошибки измерения в \sqrt{N} раз [10].

Таким образом, наличие двух составляющих вектора скорости v_x, v_y , нормальных к направлению облучения, в рассматриваемом радиолокационном канале приводит к большим погрешностям измерения, не удовлетворяющим требованиям метеообеспечения. Однако, дополнение рассмотренного выше канала адаптивным следящим устройством позволит получить оценку вектора скорости с удовлетворительной для метеообеспечения точностью.

3. Исследование характеристик радиолокационного канала измерения вектора скорости метеообразования методом имитационного моделирования

Сложность зависимостей между параметрами метеообразований и точностными характеристиками радиолокационного канала измерения вектора скорости метеообразования определяет необходимость исследования этих характеристик методами имитационного моделирования. Структура имитационной модели показана на рис. 11.

Метеообразование моделируется в пределах одного элемента разрешения и представлено совокупностью точечных отражателей, расположенных на плоской поверхности, нормальной к направлению облучения. Отражатели расположены эквидистантно с шагом – $\Delta x \times \Delta y = 1 \times 1$ м, так что их общее число равно $N_x \times N_y = 300 \times 300$.

Каждая отражающая точка имеет одинаковую для всех постоянную составляющую коэффициента отражения $\sigma_c = 0,5$ м² и случайную составляющую, задаваемую некоррелированным комплексным случайным процессом, распределенным по нормальному закону с нулевым средним и СКО $\sigma_0 = 1$ м².

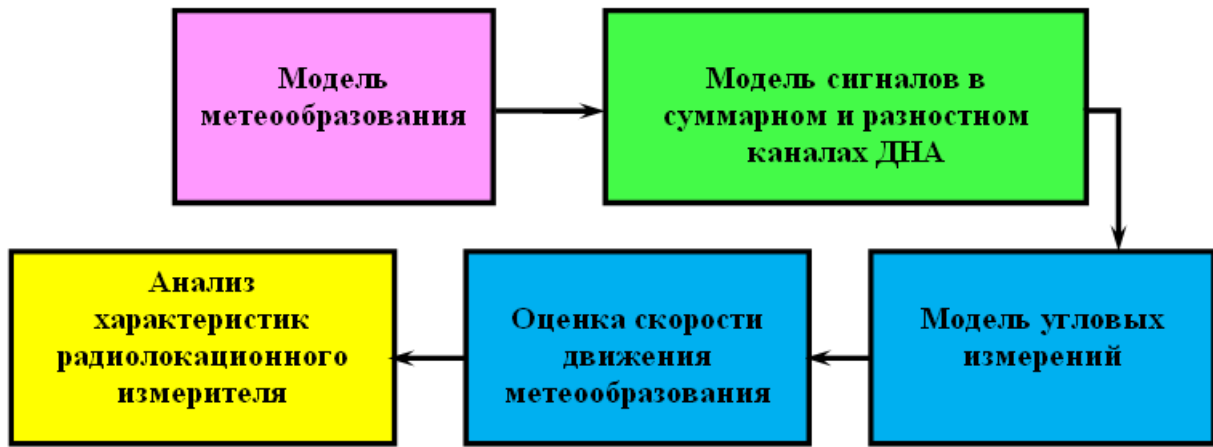


Рис. 11. Структура имитационной модели радиолокационного канала измерителя вектора скорости метеообразования

Модель метеообразования

Движение метеообразования представлено двумя составляющими:

– ламинарным потоком ветра, задаваемым одинаковым для всех точек

вектором скорости $\mathbf{V} = [V_r \quad V_x \quad V_y]^T$;

– случайной скоростью с радиальной составляющей V_s , значение которой различно для каждой точки и распределено по нормальному закону с нулевым средним и СКО σ_v .

Для каждой отражающей точки с координатами x_{nx} , y_{ny} рассчитывается доплеровский сдвиг частоты отраженного от нее сигнала

$$f_d(n_x, n_y) = \frac{2}{\lambda} \left(\frac{RV_r + x_{nx}V_x + y_{ny}V_y}{\sqrt{R^2 + x_{nx}^2 + y_{ny}^2}} + V_s \right).$$

Распределение значений доплеровских сдвигов частоты по полю элемента разрешения и его сечение вдоль горизонтальной оси $f_{d,nx,0}$ представлены на рис. 12.

Поле частот сдвинуто вдоль оси f_d на величину $f_0 = 2V_r / \lambda = 200$ Гц, ширина спектра доплеровских частот за счет ламинарного движения составляет $\Delta F = 10$ Гц.

В модели принято, что все параметры отражающих точек неизменны в

течение времени накопления сигнала T_c .

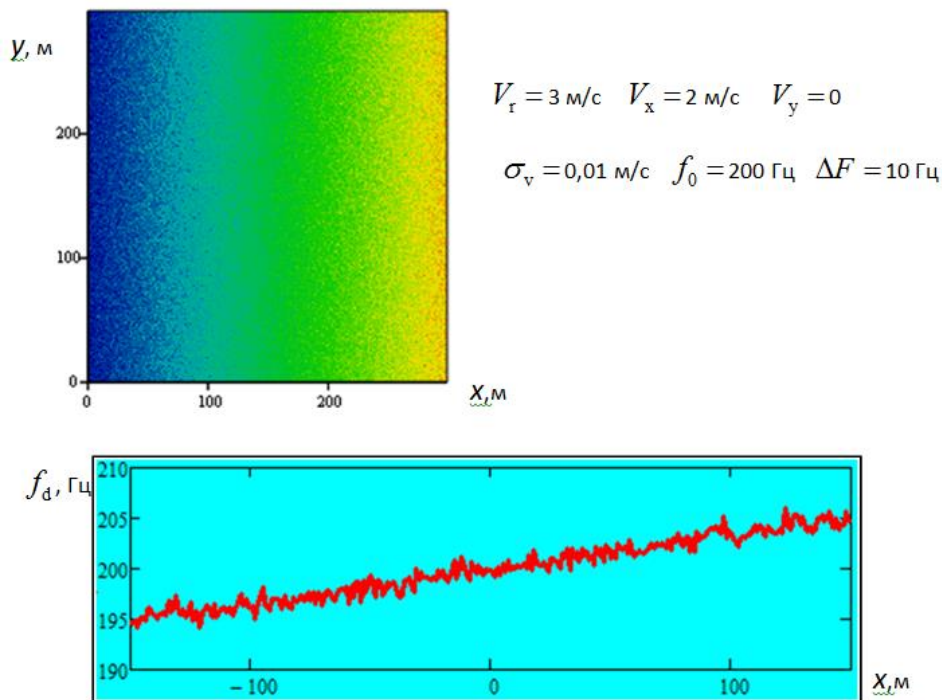


Рис. 12. Поле доплеровских сдвигов частоты в элементе разрешения

Модель сигналов на выходах фильтров суммарной и разностной ДНА

Сигнал в фильтрах рассчитывается как сумма сигналов, принимаемых от точечных отражателей в метеообразовании. Сигнал от точечного отражателя описывается функцией [10]

$$S(f_m) = \text{sinc}\{af_m\} \exp\left\{-\frac{f_m^2}{b}\right\},$$

где коэффициенты a, b определяют разрешающую способность РЛС по частоте и уровень боковых лепестков доплеровских фильтров (рис. 13).

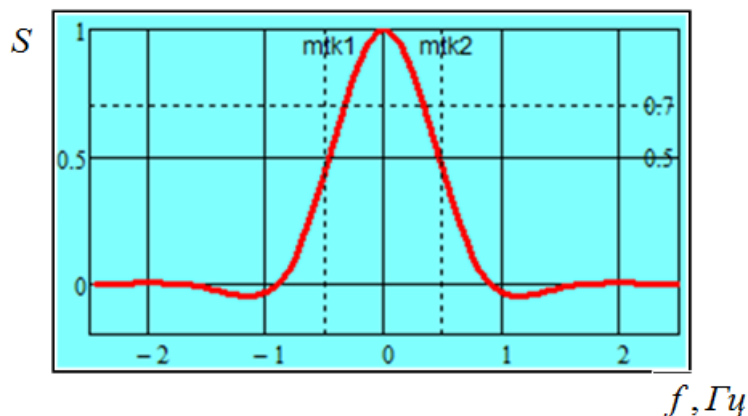


Рис. 13. Отклик МРЛК на точечный отражатель

Соответственно, сигналы в фильтровых каналах имеют вид:

– суммарный канал:

$$S(f_m) = \sum_{n_x} \sum_{n_y} p(n_x, n_y) \text{sinc} \{ a(f_m - f_d(n_x, n_y)) \} \exp \left\{ - \frac{(f_m - f_d(n_x, n_y))^2}{b} \right\}; \quad (7)$$

– разностный канал в горизонтальной плоскости:

$$S^{(\Delta x)}(f_m) = \sum_{n_x} \sum_{n_y} p^{(\Delta x)}(n_x, n_y) \text{sinc} \{ a(f_m - f_d(n_x, n_y)) \} \exp \left\{ - \frac{(f_m - f_d(n_x, n_y))^2}{b} \right\}; \quad (8)$$

– разностный канал в вертикальной плоскости:

$$S^{(\Delta y)}(f_m) = \sum_{n_x} \sum_{n_y} p^{(\Delta y)}(n_x, n_y) \text{sinc} \{ a(f_m - f_d(n_x, n_y)) \} \exp \left\{ - \frac{(f_m - f_d(n_x, n_y))^2}{b} \right\}; \quad (9)$$

где $p(n_x, n_y)$, $p^{(\Delta x)}(n_x, n_y)$, $p^{(\Delta y)}(n_x, n_y)$ – комплексные амплитуды сигналов в каналах суммарной и разностных ДНА. Предполагается, что пеленгационные характеристики разностных вертикального и горизонтального каналов линейны в пределах разрешаемого элемента.

Пример сигналов (7) – (9) приведен на рис. 14, из которого видно, что при отсутствии вертикальной составляющей скорости сигнал в вертикальном разностном канале мал. По сравнению с сигналом в горизонтальном разностном канале, он практически равен нулю.

При наличии обеих составляющих скорости V_x , V_y (рис. 15) сигнал присутствует в обоих разностных каналах, вертикальном и горизонтальном, причем интенсивность его больше в том канале, которому соответствует большее значение составляющей скорости метеообразования. Сигнал в суммарном канале также меняет свой вид – размер центрального участка, имеющего относительно постоянную величину сигнала, сокращается.

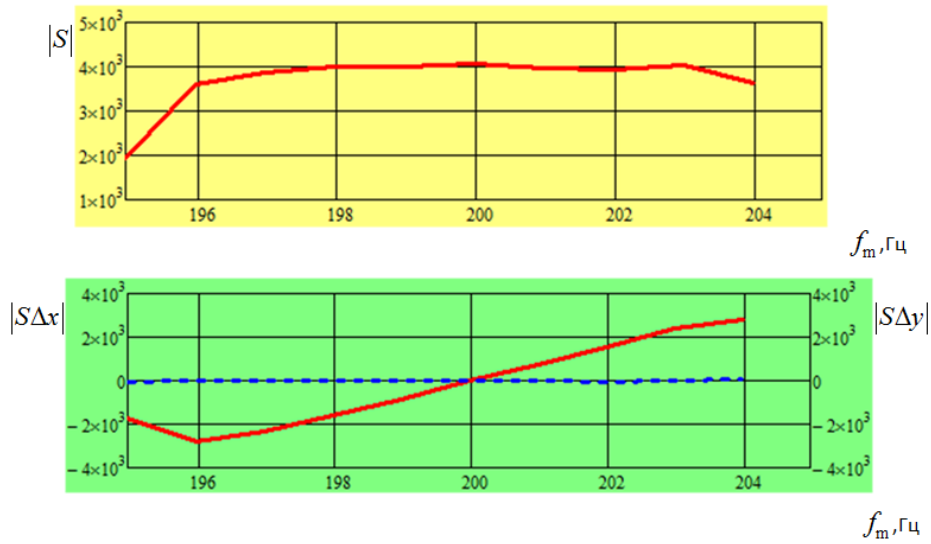


Рис. 14. Сигналы в фильтрах суммарного и разностных каналов, $V_x = 5$ м/с,
 $V_y = 0$

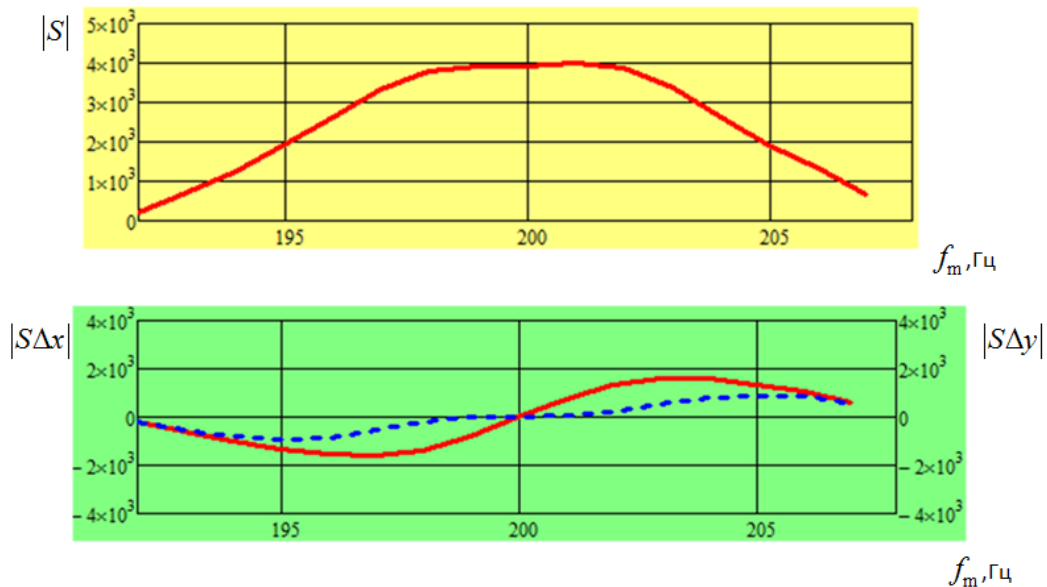


Рис. 15. Сигналы в фильтрах суммарного и разностных каналов, $V_x = 5$ м/с,
 $V_y = 3$ м/с

Всего в зоне фильтрации в каждом приемном канале размещено, в данном примере, по 10 фильтров с полосой пропускания 1 Гц, размещенных с интервалом 1 Гц.

Модель угловых измерений

Углы прихода сигналов для каждой пары m -х идентичных фильтров в суммарном и разностных каналах вычисляются в предположении линейности пеленгационной характеристики по формулам

$$\theta_{x_m} = \operatorname{Re} \left\{ \frac{S^{(\Delta x)}(f_m) \Delta x}{S_m R k_x} \right\},$$

$$\theta_{y_m} = \operatorname{Re} \left\{ \frac{S^{(\Delta y)}(f_m) \Delta y}{S_m R k_y} \right\},$$

где k_x, k_y – коэффициенты крутизны пеленгационной характеристики.

Примеры угловых расчетов приведены на рис. 16 для двух моделей состояния метеообразования.

При отсутствии вертикальной составляющей скорости значения угла в горизонтальной плоскости вычисляются с высокой точностью. Измерения угла в вертикальной плоскости дают близкие к нулю значения, что объясняется низким уровнем сигнала в вертикальном разностном канале (см. рис. 16).

Когда присутствуют обе, вертикальная и горизонтальная, составляющие вектора скорости метеообразования, углы измеряются с ошибками, причем величина ошибок больше в том канале, где меньше значение вектора скорости.

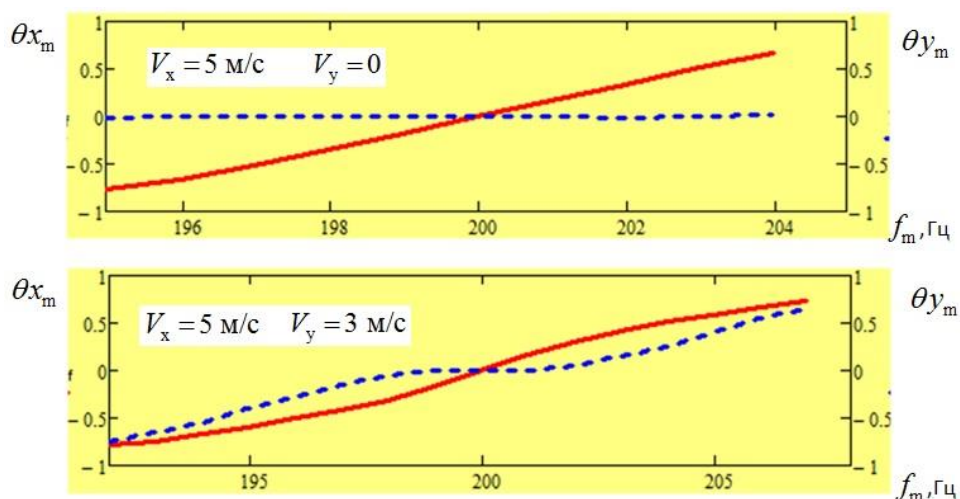


Рис. 16. Измеренные значения углов в разностных каналах $V_x = 5$ м/с, $V_y = 0$ и $V_y = 3$ м/с

Оценка скорости движения метеообразований

Оценка составляющих вектора скорости движения метеообразования выполняется методом линейного регрессионного анализа, исходя из

измеренного распределения углов прихода сигналов по частоте $\theta_{x_m}, \theta_{y_m}$, независимо для вертикального и горизонтального каналов.

Для горизонтального канала:

$$\tilde{k}_x = \frac{\left(\sum_m \hat{f}_m\right)^2 - N \sum_m \hat{f}_m^2}{\sum_m \hat{f}_m \sum_m \hat{\theta}_{x_m} - N \sum_m \hat{f}_m \hat{\theta}_{x_m}}, \quad (9)$$

$$\tilde{f}_0 = -\frac{1}{N} \left(\tilde{k}_x \sum_m \hat{\theta}_{x_m} - \sum_m \hat{f}_m \right).$$

$$\tilde{v}_R = \frac{\lambda \tilde{f}_0}{2}, \quad \tilde{v}_x = \frac{\lambda \tilde{k}_x}{2}. \quad (10)$$

Для вертикального канала:

$$\tilde{k}_y = \frac{\left(\sum_m \hat{f}_m\right)^2 - N \sum_m \hat{f}_m^2}{\sum_m \hat{f}_m \sum_m \hat{\theta}_{y_m} - N \sum_m \hat{f}_m \hat{\theta}_{y_m}}, \quad (11)$$

$$\tilde{f}_0 = -\frac{1}{N} \left(\tilde{k}_y \sum_m \hat{\theta}_{y_m} - \sum_m \hat{f}_m \right).$$

$$\tilde{v}_R = \frac{\lambda \tilde{f}_0}{2}, \quad \tilde{v}_y = \frac{\lambda \tilde{k}_y}{2}. \quad (12)$$

Полученные при моделировании для одной реализации путём расчета по формулам (9) – (12) оценки скорости движения метеообразования равны:

– для $V_R = 3$ м/с, $V_x = 5$ м/с, $V_y = 0$: $\tilde{v}_R = 2,99$ м/с, $\tilde{v}_x = 5,22$ м/с, $\tilde{v}_y = 34,4$ м/с.

– для $V_R = 3$ м/с, $V_x = 5$ м/с, $V_y = 3$ м/с: $\tilde{v}_R = 2,99$ м/с, $\tilde{v}_x = 7,6$ м/с, $\tilde{v}_y = 10,3$ м/с.

Существенное влияние на вид и характеристики сигналов на этапах измерения оказывает наличие введенной при моделировании постоянной составляющей коэффициента отражения метеообразования σ_c . В реальной ситуации эта составляющая может быть равна нулю или пренебрежимо мала. Рассмотрим характеристики измерительного устройства при $\sigma_0 = 0,001$ м², $\sigma_c = 0$, $V_y = 0$, сохраняя неизменными остальные параметры моделирования.

Сигналы в суммарном и разностных приёмных каналах для этого случая

представлены на рис. 17 (аналог рисунка 15). Значение амплитуды сигнала в каждом фильтре является случайной величиной, однако сохраняется значительное превышение интенсивности сигнала в горизонтальном разностном канале над вертикальным.

Измеренные значения углов в горизонтальном и вертикальном разностных каналах показаны на рис. 18 (аналог рис. 16). Измерения углов в обоих каналах выполняется с погрешностями, значительно большими, чем при наличии σ_c , однако тенденция к росту измеренного угла в горизонтальном канале сохраняется.

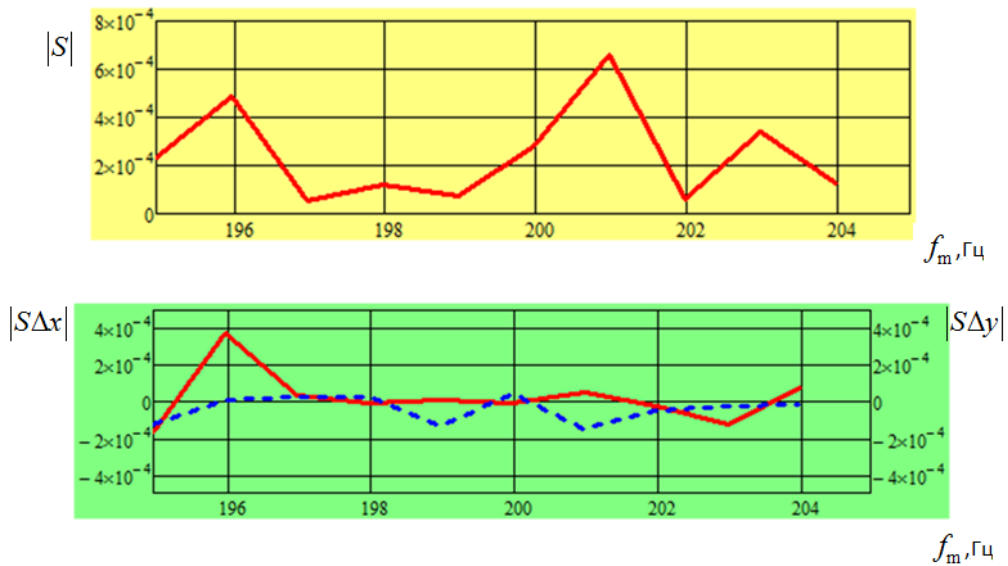


Рис. 17. Сигналы в фильтрах суммарного и разностных каналов, $V_x = 5$ м/с,

$$V_y = 0, \sigma_c = 0$$

Полученные путём расчета по формулам (9) – (12) оценки скорости движения метеообразования равны:

– для $V_R = 3$ м/с, $V_x = 5$ м/с, $V_y = 0$: $\check{v}_R = 2,99$ м/с, $\check{v}_x = 5,27$ м/с, $\check{v}_y = 29,7$ м/с.

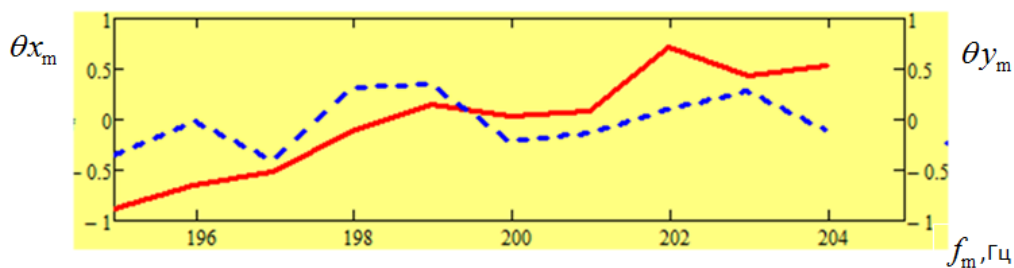


Рис. 18. Измеренные значения углов в разностных каналах

$$V_x = 5 \text{ м/с}, V_y = 3 \text{ м/с}, \sigma_c = 0$$

Таким образом, отсутствие постоянной составляющей в коэффициенте отражения метеообразования практически не снижает точность измерения составляющих вектора скорости, что объясняется слабой чувствительностью угломерного метода к амплитуде сигнала при большой величине отношения сигнал/внутренний шум (в данном случае моделировались измерения при отсутствии внутреннего шума).

Аналогичные результаты даёт моделирование для других реализаций случайных процессов и для других значений составляющих вектора скорости движения метеообразования.

Радиальная составляющая вектора скорости измеряется с высокой точностью независимо от значений скорости ортогональных составляющих.

Одна из ортогональных составляющих вектора скорости (горизонтальная или вертикальная) измеряются с высокой точностью, если другая составляющая равна или близка к нулю.

Наличие в скорости движения метеообразования двух ортогональных составляющих, близких по величине, приводит к возникновению больших ошибок измерения, не удовлетворяющих требованиям классификации параметров метеобеспечения.

Существует способ оценки достоверности полученных измерений – если сигнал в одном из каналов (вертикальном или горизонтальном) значительно больше, чем в другом, значит, измерения в этом канале достаточно точны, а скорость в другом канале близка к нулю. Если сигналы в обоих каналах сравнимы по величине, измерения в них недостоверны.

Последнее из отмеченных свойств измерительной системы позволяет предложить её усовершенствование, позволяющее выполнять достаточно точные измерения составляющих вектора скорости при любом соотношении величин ортогональных составляющих V_x, V_y .

Необходимо использовать адаптивную следящую систему, разворачивающую плоскости нулей ДНА до тех пор, пока разница

интенсивности сигналов в горизонтальном и вертикальном каналах не станет максимальной (рис. 19). При этом измерение в канале с большой амплитудой сигнала даст значение модуля вектора скорости, а угол разворота ДНА определит направление движения метеообразования в картинной плоскости.

Применение такого метода увеличивает время измерения до нескольких секунд, однако это вполне допустимо при оценке метеобстановки в районе аэродрома, тем более что при переходе от измерений в одном элементе разрешения к измерениям в последующих элементах время адаптации сокращается.

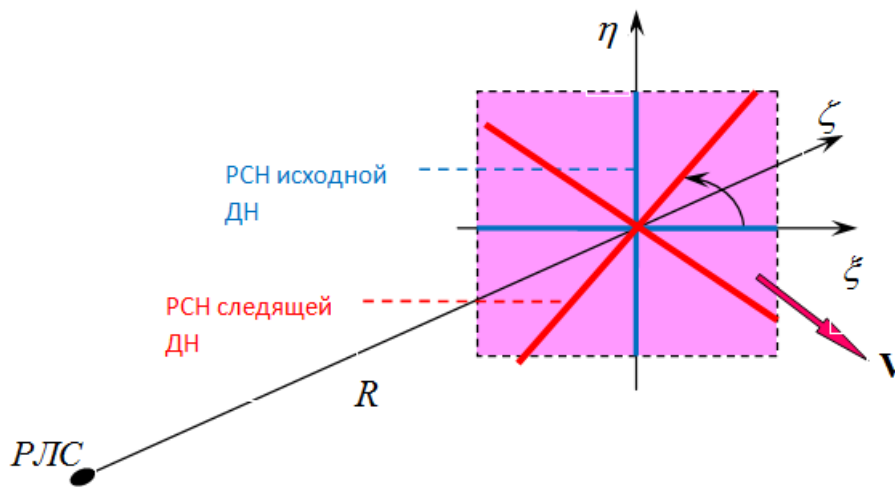


Рис. 19. Принцип слежения за диаграммой направленности

Для дальнейшего исследования потенциальных характеристик угломерного метода измерения вектора скорости метеообразований будем рассматривать только случай наличия одной из ортогональных составляющих вектора скорости V_x , полагая, что составляющая V_y приведена к нулю за счёт адаптивного управления ДНА.

4. Влияние шумовых составляющих сигналов на характеристики радиолокационного канала измерения вектора скорости метеообразования

Основное влияние на величину ошибок измерения вектора скорости метеообразования в рассматриваемом канале оказывают две шумовых составляющих:

- внутренние шумы приёмного устройства;

– случайное (хаотичное) движение частиц, формирующих отражающее облако.

Вначале рассмотрим результат их воздействия по отдельности, а затем оценим их совместное влияние на точность измерения.

Влияние внутреннего шума приёмников на точность измерения вектора скорости

Внутренний шум приёмников, прежде всего, определяет точность измерения угла прихода сигнала в каждом доплеровском фильтре [11].

Для получения возможно более обобщенных зависимостей, не связанных напрямую с характеристиками метеообразований и техническими параметрами РЛС, влияние внутреннего шума будем оценивать через отношение сигнал/шум

$$q = \frac{P_c}{P_{ш}}$$

где под P_c понимается суммарная мощность отраженного от метеообразования сигнала в суммарном приёмном канале, а $P_{ш}$ – мощность шума в пределах ширины участка анализируемого спектра.

Результаты моделирования показаны на рис. 20. Графики построены для двух истинных значений тангенциальной составляющей скорости метеообразования – $V_x = 5$ м/с и $V_x = 15$ м/с, при $V_r = 3$ м/с.

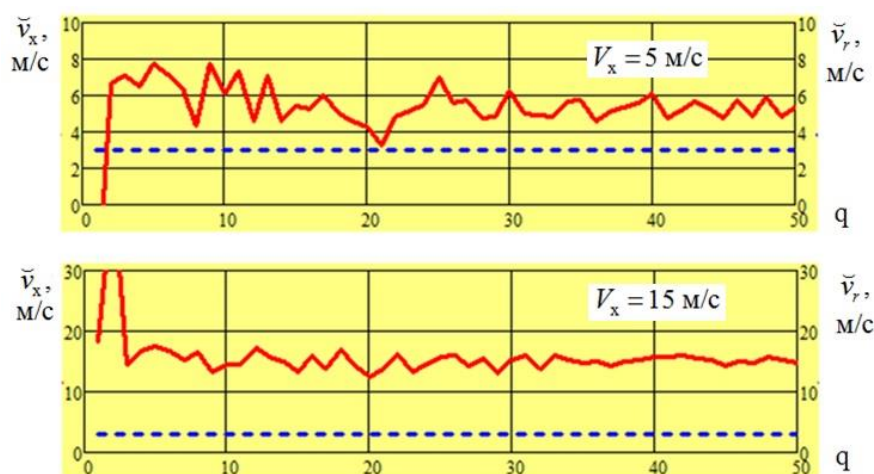


Рис. 20. Зависимость точности измерений от отношения сигнал/шум, $V_r = 3$ м/с.

Анализ этих зависимостей и результатов моделирования при других параметрах РЛС и метеообразований показывает, что измерение радиальной составляющей скорости выполняется радиолокационным каналом с высокой точностью даже при малых значениях отношения сигнал/внутренний шум, а относительная точность измерения тангенциальной составляющей скорости тем выше, чем выше абсолютное значение этой скорости. Для малых V_x удовлетворительная точность достигается при $q \geq 15$ дБ, для больших V_x такая точность достигается при меньших значениях отношения сигнал/внутренний шум, удовлетворяющих условию $q \geq 10$ дБ.

Влияние хаотичной составляющей движения в метеообразовании на точность измерения вектора скорости

Рассмотрим влияние на точность измерений хаотической составляющей движения метеообразования при большом значении отношения сигнал/внутренний шум $q = 17$ дБ.

Хаотическое движение в метеообразовании задается случайными значениями радиальной составляющей скорости движения отражающих частиц V_s . Пространственное распределение V_s является некоррелированным случайным процессом, распределенным по нормальному закону с нулевым средним и СКО равным σ_v . Рассмотрим два метеообразования с параметрами:

- 1) $V_R = 3$ м/с, $V_x = 5$ м/с, $V_y = 0$;
- 2) $V_R = 3$ м/с, $V_x = 15$ м/с, $V_y = 0$.

Соответствующие пространственные распределения доплеровского сдвига частоты отраженных сигналов при $\sigma_v = 0,05$ м/с представлены на рис. 21. Как видно из рисунка, при относительно слабой горизонтальной составляющей скорости ветра $V_x = 5$ м/с визуально наблюдается полное подавление регулярной составляющей частотного распределения. Однако, как будет показано далее, измерения регулярных составляющих скорости возможны и в этих условиях.

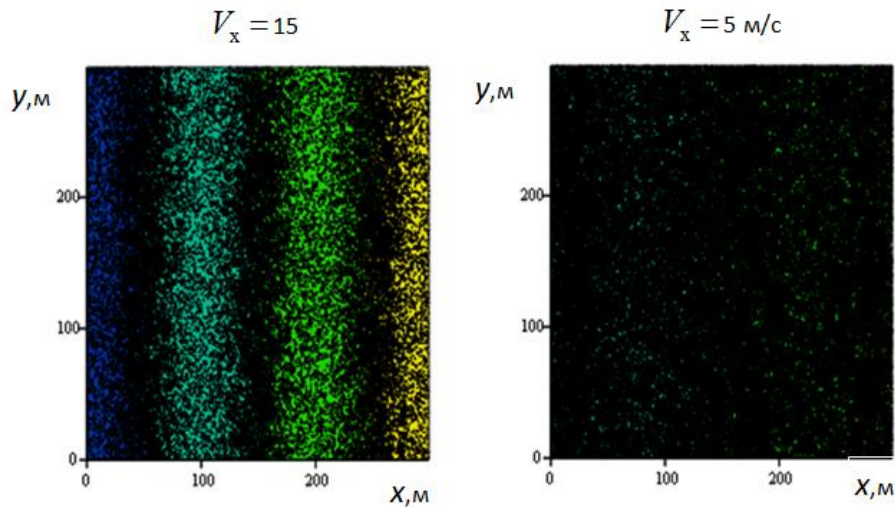


Рис. 21. Поле доплеровских сдвигов частоты в элементе разрешения, $\sigma_v = 0,05$ м/с

На рис. 22 показаны сигналы на выходах фильтров суммарного и разностного каналов (без учёта внутреннего шума приёмников) для различных значений интенсивности хаотического движения σ_v . Как видно, наличие хаотической составляющей существенно снижает уровень сигнала за счёт его «размазывания» по частотному диапазону. Таким образом, ухудшение точности измерений при увеличении σ_v происходит не только за счет собственно скоростного шума, но и за счет уменьшения отношения сигнал/внутренний шум. Измеренные значения составляющих вектора скорости метеообразования представлены на рис. 23.

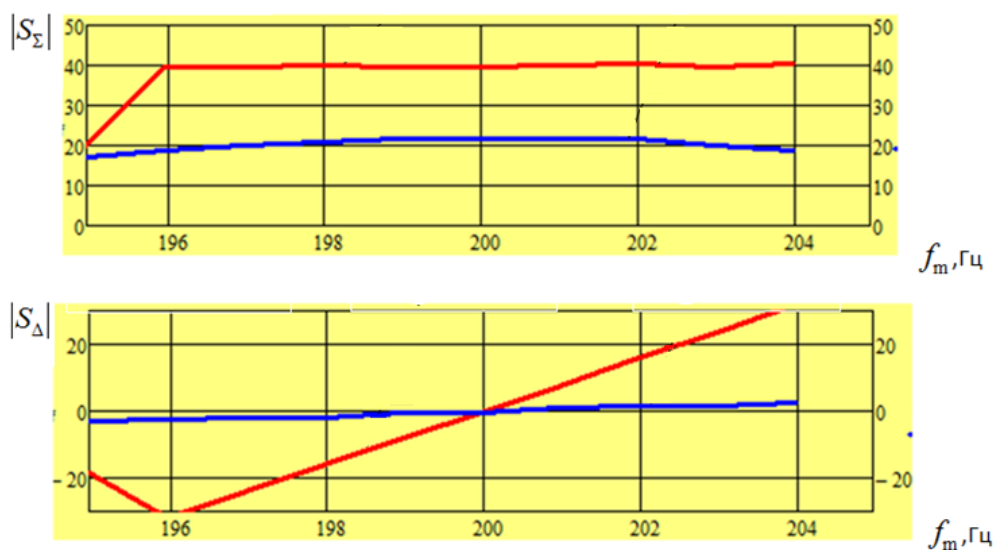


Рис. 22. Сигналы на выходах фильтров суммарного $|S_\Sigma|$ и разностного $|S_\Delta|$ каналов, $V_x = 5$ м/с, $V_y = 0$ (красная линия – $\sigma_v = 0,005$ м/с; синяя линия – $\sigma_v = 0,1$ м/с)

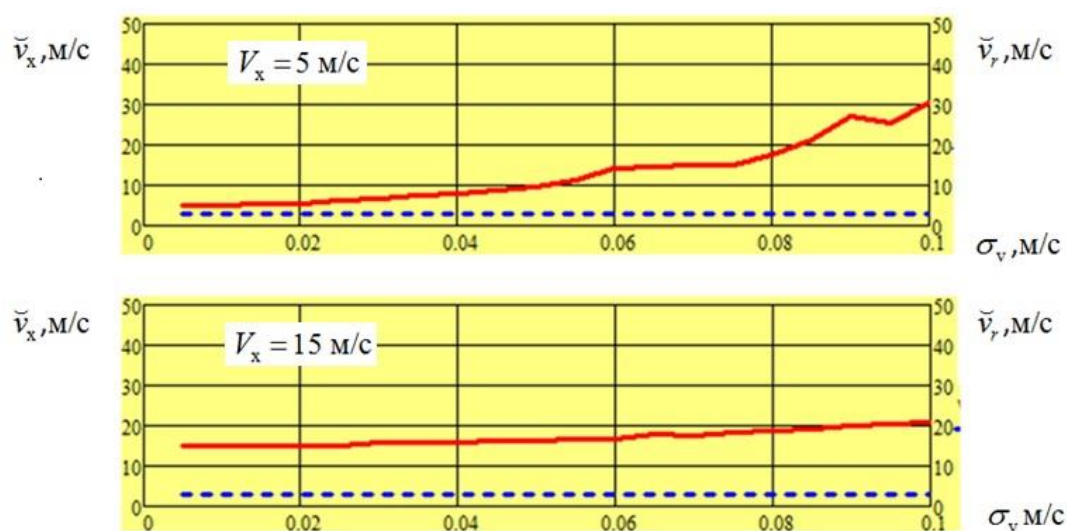


Рис. 23. Зависимость точности измерений от интенсивности скоростного шума,

$$V_r = 3 \text{ м/с}$$

При горизонтальной составляющей скорости ветра порядка 15 м/с удовлетворительная точность измерения достигается при СКО хаотической составляющей менее 8 см/с.

Радиальная составляющая скорости ветра измеряется с высокой точностью практически независимо от интенсивности хаотической составляющей во всем рассмотренном диапазоне значений σ_v .

Анализ этих зависимостей и результатов моделирования при других параметрах радиолокационного канала и метеообразований показывает, что измерение радиальной составляющей скорости выполняется системой с высокой точностью в широком диапазоне интенсивностей скорости хаотического движения в метеообразовании.

Предельно допустимые значения СКО хаотической составляющей скорости движения метеообразования, обеспечивающие приемлемую точность измерения тангенциальной составляющей скорости, тем выше, чем выше абсолютное значение этой скорости. Для малых V_x удовлетворительная точность достигается при $\sigma_v \leq 5$ см/с, для больших V_x такая точность достигается при больших значениях СКО, удовлетворяющих условию $\sigma_v \leq 8$ см/с.

На рис. 24, 25 представлены результаты имитационного моделирования радиолокационного канала с моноимпульсным угломером для оценки совместного влияния хаотичной составляющей движения в метеообразании и внутреннего шума приёмников на точность измерения вектора скорости

Моделирование выполнено для двух значений отношения сигнал/внутренний шум: $q = 15$ дБ и $q = 10$ дБ (для сравнения используются, также, графики на рис. 24, полученные при $q = 17$ дБ).

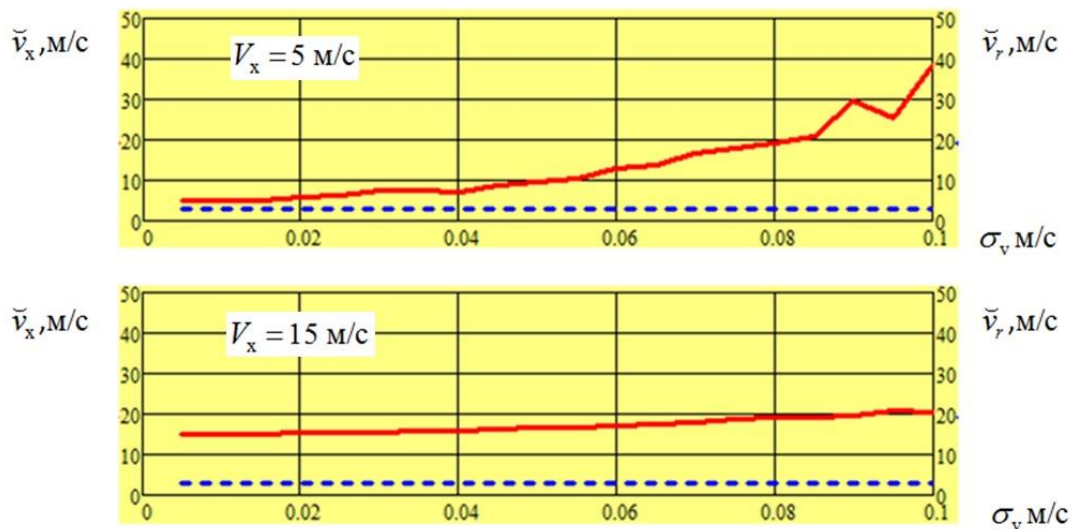


Рис. 24. Зависимость точности измерений от интенсивности скоростного шума при $V_r = 3 \text{ м/с}$, $q = 17 \text{ дБ}$

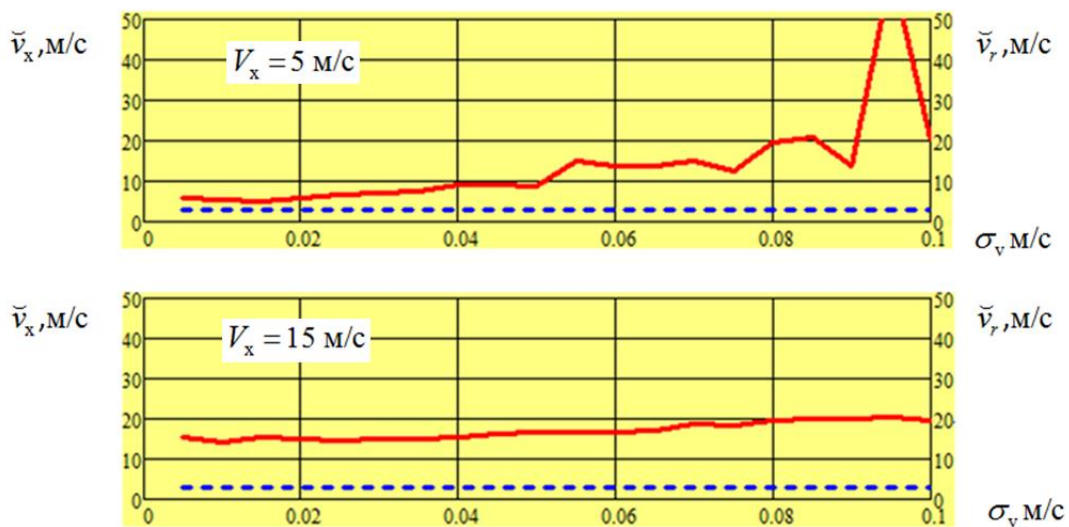


Рис. 25. Зависимость точности измерений от интенсивности скоростного шума при $V_r = 3 \text{ м/с}$, $q = 7 \text{ дБ}$

Анализ графиков рис. 23 – 25 показывает, что оценка радиальной составляющей скорости выполняется радиолокационным каналом с высокой точностью в широком диапазоне интенсивностей скорости хаотического движения в метеообразовании и значений отношения сигнал/внутренний шум, а точность измерения тангенциальной составляющей скорости в рассматриваемом диапазоне интенсивностей хаотической составляющей тем меньше зависит от отношения сигнал/внутренний шум, чем выше абсолютное значение этой составляющей скорости.

Вид пространственного распределения доплеровских сдвигов частот отраженных от метеообразования сигналов в пределах разрешаемого ДНА элемента чувствителен ко всем составляющим вектора скорости ламинарного движения отражающей поверхности. Диапазон изменения частот составляет единицы и десятки герц при относительной скорости движения в единицы метров в секунду, что позволяет реализовать радиолокационное измерение полного вектора скорости при условии выполнении частотных измерений с точностью в единицы герц и угловых измерений с точностью в доли градуса.

5. Выводы

1. В рамках цифро-натурного метода оценки характеристик МРЛК получена математическая модель радиолокационного канала измерения вектора скорости опасных метеообразований.

2. Для оценки полного вектора скорости ламинарного движения метеообразования предлагается использовать радиолокационный канал с моноимпульсной в двух плоскостях, вертикальной и горизонтальной, диаграммой направленности антенны и длительным, порядка одной секунды, когерентным накоплением сигнала.

2. Обработка сигналов заключается в узкополосной доплеровской фильтрации сигналов, принимаемых суммарной и двумя разностными диаграммами направленности антенны, затем в оценке моноимпульсным методом угла прихода сигналов для каждой пары идентичных фильтров в этих

каналах и, наконец, в оценке составляющих вектора скорости метеообразования методом линейного регрессионного анализа.

3. Для обеспечения требуемой точности измерений необходимо использование адаптивной следящей системы, которая разворачивает плоскости нулей ДНА до тех пор, пока разница интенсивности сигналов в горизонтальном и вертикальном каналах не станет максимальной. При этом измерение в канале с большой амплитудой сигнала даёт значение модуля вектора скорости, а угол разворота ДНА определит направление движения метеообразования в картинной плоскости.

4. Оценка радиальной составляющей скорости выполняется радиолокационным каналом с высокой точностью даже при малых значениях отношения сигнал/внутренний шум и при относительно большой интенсивности хаотической составляющей движения метеообразования.

5. Относительная точность измерения тангенциальной составляющей скорости тем выше, чем выше абсолютное значение этой скорости. Достаточная для решения задач метеообеспечения точность измерения тангенциальной составляющей скорости может быть обеспечена при значении отношения сигнал/внутренний шум более 10 дБ, при условии, что СКО хаотической составляющей скорости метеообразования не превышает 5...10 см/с.

Литература

1. Жуков В.Ю., Щукин Г.Г. Состояние и перспективы сети доплеровских метеорологических радиолокаторов // Метеорология и гидрология, 2014, № 2. С. 92-100.

2. Денисенков Д.А., Жуков В.Ю., Первушин Р.В., Щукин Г.Г. Метод обнаружения сдвига ветра при помощи доплеровского метеорологического радиолокатора // Радиотехнические и телекоммуникационные системы, 2016, № 3. С. 68-73.

3. Мельников В.М. Обработка информации в доплеровских МРЛ // Зарубежная радиоэлектроника, 1993, № 4. С.35 – 43.

4. Руководство по сдвигу ветра на малых высотах. Международная организация гражданской авиации, 2005. URL: [http:// aerohelp.ru/ data/ 432/ Doc9817.pdf](http://aerohelp.ru/data/432/Doc9817.pdf)
5. Williams C.R., Beauchamp R.M., Chandrasekar V. Vertical Air Motions and Raindrop Size Distributions Estimated Using Mean Doppler Velocity Difference From 3- and 35-GHz Vertically Pointing Radars // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, Vol. 54, No. 10, pp. 6048-6060.
6. Безуглов А.А., Галаева К.И., Детков А.Н. Метеорологический радиолокационный комплекс обеспечения безопасности полётов авиации в различных климатических зонах // *Полёт*. 2017. № 3-4. С. 46-50.
7. Исаев С.А., Кондратенков Г.С. Цифро-натурные и лётно-модельные методы испытаний КБО // *Радиотехника*. 1996. № 9. С. 124-128.
8. Исаев С.А., Клишин Ю.П. Цифро-натурный метод оценки характеристик радиоэлектронных систем // *Радиотехника*. 2001. № 8. С. 61-64.
9. Doviak R.J., Zrnić D.S. *Doppler Radar and Weather Observations*, 2nd ed. San Diego: Academic Press. 1993. 562 p.
10. Дудник П.И., Чересов Ю.И. Авиационные радиолокационные устройства. М: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1986. 528 с.
11. Дудник П.И., Ильчук А.Р., Татарский Б.Г. Многофункциональные радиолокационные системы. М.: Дрофа, 2007. 283 с.

Ссылка на статью:

А. Н. Детков, И. А. Сеницын, А. А. Безуглов. Математическая модель радиолокационного канала измерения вектора скорости опасных метеорологических явлений в ближней аэродромной зоне. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №9. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/sep17/12/text.pdf>