

## ЛОКАЦИЯ И НАВИГАЦИЯ

УДК 621.396.551.553

### ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛИНЕЙНОЙ СКОРОСТИ ВЕТРА ОДНОПОЗИЦИОННОЙ ДОПЛЕРОВСКОЙ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ РЛС

Н. И. КРАВЧЕНКО

Получено соотношение для расчета дисперсии погрешностей оценок линейной скорости ветра однопозиционной доплеровской РЛС в предположении, что скорость ветра в интересующей локальной области пространства одинакова и дисперсия оценок доплеровского смещения частоты известна.

The ratio for calculation of the dispersion of estimation lapses of the linear velocity of the wind of one-item Doppler RADAR is obtained, in the supposition that wind speed in the local space area of interest is the same and Doppler frequency drift estimations dispersion is known.

Характеристики точности измерения линейной скорости ветра доплеровскими метеорологическими РЛС (ДМРЛ) относятся к ее важнейшим тактическим характеристикам. Считается [1], что для надежного прогнозирования синоптиками погоды среднеквадратическая ошибка  $\sigma_v$  измерения скорости ветра  $V$  не должна превосходить 1 м/с.

Погрешности измерения радиальной скорости ветра зависят от многих факторов: от отношения сигнал/шум, отношения мощности пассивной помехи к полезному сигналу, от длительности обрабатываемой пачки отраженных импульсов, от статистических характеристик отражений от облаков гидрометеоров, от реализуемого метода измерений и параметров измерителя, от нестабильностей параметров ДМРЛ (несущих частот местного гетеродина приемника и передатчика, коэффициентов усиления приемопередающих трактов).

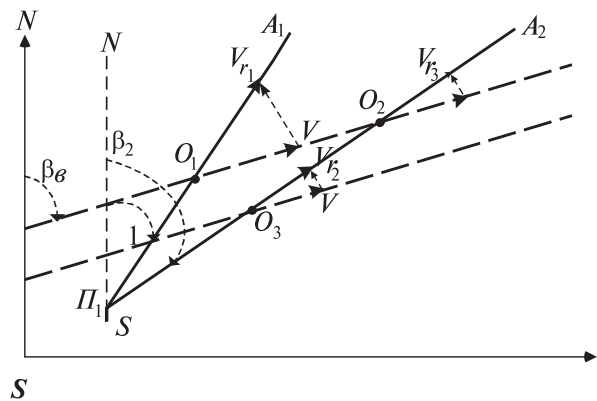
Достаточно детально исследованы зависимости погрешностей измерения доплеровского смещения частоты  $F_D$  метеосигналов, в котором содержится информация о радиальной скорости ветра  $V_r$ , от отношения мощностей полезного метеосигнала и флуктуационной шумовой помехи, от частоты следования зондирующих импульсов и длительности обрабатываемой пачки, от корреляционных свойств метеосигналов, характеризующихся значением междупериодной корреляции, в работах [2], [3].

Как показано в работе [4], оценка линейной скорости ветра  $\hat{V}$  однопозиционной доплеровской ДМРЛ, выражается через измеренные для двух положений антенны  $\beta_1$  и  $\beta_2$  (рисунок) доплеровские смещения частот  $\hat{F}_{D_1}$  и  $\hat{F}_{D_2}$  следующим соотношением

$$\hat{V} = -\frac{\lambda}{2 \sin(\beta_2 - \beta_1)} \sqrt{\hat{F}_{D_1}^2 + \hat{F}_{D_2}^2 - 2 \hat{F}_{D_1} \hat{F}_{D_2} \cos(\beta_2 - \beta_1)}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  — длина волны.

На рисунке обозначено:  $\Pi_1$  — точка стояния ДМРЛ; пунктирными линиями показаны направления ветра, характеризуемые азимутом  $\beta_\theta$ ; направления луча антенны, характеризуемые текущими азимутами  $\beta_1$  и  $\beta_2$ , при которых определяются доплеровские смещения частоты  $\hat{F}_{D_1}$  и  $\hat{F}_{D_2}$  для выбранных разрешаемых элементов по дальности (точка  $O_1, O_2$  (или  $O_3$ )), показаны сплошными линиями  $\Pi_1 A_1$  и  $\Pi_1 A_2$ .



Определение линейной скорости ветра  
однопозиционной ДМРЛ

Ниже выводится соотношение для расчета дисперсии погрешностей линейной скорости ветра  $\sigma_V^2$  однопозиционной ДМРЛ. Полагается, что дисперсия оценок доплеровского смещения частоты метеосигнала  $\sigma_F^2$  известна (и соответственно радиальной скорости ветра  $\sigma_{V_2}^2 = \left(\frac{\lambda}{2} \sigma_F\right)^2$ ).

Из соотношения (1) видно, что погрешности измерения линейной скорости ветра зависят от погрешностей измерения доплеровских смещений  $\hat{F}_{D_1}$ ,  $\hat{F}_{D_2}$ , от величины разности азимутов  $(\beta_2 - \beta_1)$ , при которых измерялись доплеровские смещения частот.

Представим текущие оценки доплеровских смещений частоты в виде  $\hat{F}_{\partial_1} = F_{\partial_1} + \Delta F_1$ ,  $\hat{F}_{\partial_2} = F_{\partial_2} + \Delta F_2$ , где  $F_{\partial_1}$ ,  $F_{\partial_2}$  – истинные значения доплеровских смещений частоты,  $\Delta F_1$ ,  $\Delta F_2$  – текущие погрешности единичных измерений частоты.

Будем полагать, что систематические ошибки измерений отсутствуют, т.е.  $M\{\Delta F_1\} = M\{\Delta F_2\} = 0$ , где  $M\{X\}$  – математическое ожидание величины  $X$ . Очевидно, значение истинной линейной скорости ветра  $V$  будет

$$V = \frac{\lambda}{2\sin(\beta_2 - \beta_1)} \sqrt{F_{\partial_1}^2 + F_{\partial_2}^2 - 2F_{\partial_1}F_{\partial_2}\cos(\beta_2 - \beta_1)}. \quad (2)$$

Дисперсия погрешностей оценки линейной скорости ветра

$$\sigma_V^2 = M\{(\hat{V} - V)^2\} = M\{\hat{V}^2\} - V^2. \quad (3)$$

При написании (3) учитывалось, что  $M\{\hat{V}\} = V$ ,  $M\{V^2\} = V^2$ . Тогда с учетом (3), (2), (1) имеем

$$\begin{aligned} \sigma_V^2 &= \left[ \frac{\lambda}{2\sin(\beta_2 - \beta_1)} \right]^2 \left[ M\{(F_{\partial_1} + \Delta F_1)^2 + (F_{\partial_2} + \Delta F_2)^2 - \right. \\ &\quad \left. - 2(F_{\partial_1} + \Delta F_1)(F_{\partial_2} + \Delta F_2)\cos(\beta_2 - \beta_1)\} - \right. \\ &\quad \left. - (F_{\partial_1}^2 + F_{\partial_2}^2 - 2F_{\partial_1}F_{\partial_2}\cos(\beta_2 - \beta_1)) \right] = \\ &= \left[ \frac{\lambda}{2\sin(\beta_2 - \beta_1)} \right]^2 2\sigma_F^2. \end{aligned} \quad (4)$$

При написании (4) полагалось, что случайные погрешности  $\Delta F_1$  и  $\Delta F_2$  статистически независимы, а их дисперсии одинаковы и равны  $M\{\Delta F_1^2\} = M\{\Delta F_2^2\} = \sigma_F^2$ .

Представим полученное выражение для  $\sigma_V$  через среднеквадратическую ошибку измерения радиальной скорости  $\sigma_{V_2} = \frac{\lambda}{2}\sigma_F$ .

$$\sigma_V = \frac{\lambda}{2}\sigma_F \frac{\sqrt{2}}{\sin(\beta_2 - \beta_1)} = \frac{\sqrt{2}}{\sin(\beta_2 - \beta_1)}\sigma_{V_2}.$$

Обсудим вопрос выбора величины  $\beta_2 - \beta_1$ . Когда  $\beta_2$  близко  $\beta_1$ , то множитель выражения

$$(1) \sqrt{\hat{F}_{\partial_1}^2 + \hat{F}_{\partial_2}^2 - 2\hat{F}_{\partial_1}\hat{F}_{\partial_2}\cos(\beta_2 - \beta_1)} \text{ стремится к} \\ \hat{F}_{\partial_1} - \hat{F}_{\partial_2} = (F_{\partial_2} - F_{\partial_1}) + (\Delta F_2 - \Delta F_1). \quad (5)$$

Поскольку при этом  $F_{\partial_2}$  близко к  $F_{\partial_1}$ , то  $(F_{\partial_2} - F_{\partial_1})$  и  $(\Delta F_2 - \Delta F_1)$  будут соизмеримы и влияние ошибок возрастает, что видно также из соотношения (4). Поэтому нецелесообразно выбирать  $(\beta_2 - \beta_1)$  слишком малым.

С другой стороны, чем больше  $(\beta_2 - \beta_1)$ , тем больше расстояние между разрешаемыми (импульсными) объемами, доплеровские смещения метеосигналов которых измеряются, вследствие чего снижается достоверность допущения об одинаковости скорости ветра в рассматриваемой локальной области пространства. Следовательно, чтобы получить поле скоростей ветра в зоне действия ДМРЛ, работающей в режиме кругового обзора и реализующей рассматриваемый метод измерения линейной скорости, величину  $(\beta_2 - \beta_1)$  нельзя выбирать слишком большой. По-видимому, целесообразно выбирать значение  $(\beta_2 - \beta_1)$  близким к  $\frac{\pi}{2}$ , когда  $\sin(\beta_2 - \beta_1) \approx \frac{1}{2}$ . Тогда  $\sigma_V \approx 3\sigma_{V_2}$ .

Заметим, что при выводе соотношения (4) не учитывались погрешности используемых значений  $\beta_2$  и  $\beta_1$ . Это оправдано тем, что  $\beta_1$  и  $\beta_2$  это не измеренные азимуты луча антенны, а отсчеты, считываемые с датчика положения антенны в моменты измерения доплеровских смещений  $F_{\partial_1}$  и  $F_{\partial_2}$ .

Проведенные расчеты показывают, что для удовлетворения требований к точности измерения линейной скорости ветра ( $\sigma_V \leq 1$  м/с), среднеквадратическая ошибка измерения радиальной скорости ветра должна быть не более 1/3 м/с. Дальнейшее повышение точности может быть достигнуто путем повторных измерений и усреднения оценок  $\hat{V}$ , найденных для соседних по пространству разрешаемых объемов.

#### Литература.

- [1] Мельников В.М. Обработка информации в доплеровских МРЛС // Зарубежная радиоэлектроника, 1993, № 4. С. 29–34.
- [2] N.I. Kravchenko. Limiting Accuracy of Measuring the Doppler Meteorosignal Frequency Shift Using Coherent Signal Burst // Telecommunications and Radio Engineering, 2000, 53 (12).
- [3] Кравченко Н.И. Определение линейной скорости ветра однопозиционной доплеровской метеорологической РЛС // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2006, вып. 146. С. 44–49.
- [4] Кравченко Н.И., Ленчук Д.В. Точностные характеристики цифрового измерителя доплеровского смещения частоты метеосигнала при работе в условиях отражений от местных предметов // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. — 2002, вып. 130.

Поступила в редколлегию 26.02.2008



**Кравченко Николай Иванович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры основ радиотехники ХНУРЭ. Область научных интересов: помехозащищенность РЛС, точность измерения параметров сигналов.