

ОДНОЗНАЧНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ВЕТРА ДОПЛЕРОВСКОЙ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ РЛС, ИСПОЛЬЗУЮЩЕЙ ПАЧКИ КОГЕРЕНТНЫХ ЗОНДИРУЮЩИХ РАДИОИМПУЛЬСОВ С РАЗЛИЧНЫМИ ПЕРИОДАМИ ПОВТОРЕНИЙ

Н. И. КРАВЧЕНКО

Проблема однозначного измерения скорости ветра возникает, когда доплеровское смещение частоты метеосигналов больше половины частоты повторения. В статье анализируется квазиоптимальный метод обработки метеосигналов, когда для каждой из пачек определяется функция корреляции и соответственно радиальные скорости $\hat{V}_{r1}$ и $\hat{V}_{r2}$, а по их разности по полученным соотношениям рассчитывается истинная радиальная скорость $\hat{V}_r$. Обсуждаются вопросы влияния и выбора длины волны и периодов повторения зондирующих импульсов на возможности однозначного измерения скорости.

The problem of the unique measuring of a velocity of the wind arises, when the Doppler bias of frequency of meteorological signals is more than half of the recurrence rate. In the paper it is analyzed a quasi-optimal method of meteorological signals processing when for each of the packs the correlation function and accordingly the radial velocities $\hat{V}_{r1}$ and $\hat{V}_{r2}$ are evaluated, and on their difference to the obtained relations the true radial velocity $\hat{V}_r$ is calculated. Problems of influence and selection of the wave length and recurring periods of sounding impulses on the possibility of the unique measuring of the velocity are considered.

Информация о скорости ветра содержится в доплеровском смещении частоты метеосигналов, которое определяют с помощью корреляционных или фильтровых измерителей, путем преобразования Фурье принятых пачек когерентных сигналов или путем нахождения междупериодной корреляционной функции, аргумент которой зависит от частоты Доплера.

Всякий раз, когда доплеровское смещение частоты $F_g = \frac{2V_r}{\lambda}$ (где V_r — радиальная скорость ветра, а λ — длина волны) больше половины частоты повторения зондирующих импульсов $\frac{1}{2}F_n = \frac{1}{2T}$ (где T — период повторения зондирующих импульсов) из-за стробоскопического эффекта возникает неоднозначность при определении как величины, так и знака радиальной скорости.

Устранить указанную неоднозначность можно, нарушив периодичность зондирующих сигналов, что достигается, например, применением пачек когерентных радиоимпульсов с различными периодами повторения.

Примером такого зондирующего сигнала может быть четырехпачечный сигнал

$$S_3(t) = E_3 \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} S_a(t - kT_1) + \sum_{e=1}^N S_a[t - (N-1)T_1 - eT_2] + \sum_{m=1}^N S_a[t - (N-1)T_1 - NT_2 - mT_3] + \sum_{n=1}^N S_a[t - (N-1)T_1 - NT_2 - NT_3 - nT_4] \right\} \quad (1)$$

$$e^{j(\omega_0 t + \varphi)} = E_3 S_a(t) e^{j(\omega_0 t + \varphi)},$$

где $S_a(t)$ — закон амплитудной модуляции одиночного радиоимпульса; N — число импульсов в каждой из пачек; T_1, T_2, T_3, T_4 — периоды повторения импульсов соответствующих пачек.

При простом прямоугольном радиоимпульсе длительностью τ_u

$$S_a(t) = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 < t < \tau_u, \\ 0 & \text{при } \tau < 0, \tau > \tau_u. \end{cases} \quad (2)$$

Поскольку оптимальная обработка при обнаружении и измерении параметров когерентных сигналов со случайной начальной фазой сводится к нахождению двумерной корреляционной функции $\psi(\tau, F) = \left| \int \dot{S}_A(t) \dot{S}_A^*(t - \tau) e^{j2\pi Ft} dt \right|$, где $\dot{S}_A(t)$ — комплексная амплитуда обрабатываемого сигнала, то возможности по однозначному измерению частоты (скорости) можно определить, найдя $\psi(0, F)$. Очевидно, ближайшая к частоте $F = 0$ частота F_m , при которой $\psi(0, F) \approx \psi(0, 0)$ характеризует предельную однозначно измеряемую частоту.

Можно показать, что для сигнала (1) с учетом (2)

$$\psi(0, F) = \tau_u \left| \frac{\sin \pi F \tau_u}{\pi F \tau_u} \left[\frac{\sin \pi F N T_1}{\sin \pi F T_1} e^{j\pi F (N-1) T_1} + \frac{\sin \pi F N T_2}{\sin \pi F T_2} e^{j\pi F [2(N-1) T_1 + (N+1) T_2]} + \frac{\sin \pi F N T_3}{\sin \pi F T_3} e^{j\pi F [2(N-1) T_1 + (N+1)(T_2 + T_3)]} + \frac{\sin \pi F N T_4}{\sin \pi F T_4} e^{j\pi F [2(N-1) T_1 + (N+1)(T_2 + T_3 + T_4)]} \right] \right|.$$

На рис. 1 и 2 изображены графики функций рассогласования $\psi(0, F)$ соответственно для двухпачечного ($N=16$; $T_1=0,00151$ с; $T_2=0,00207$ с; $T_{\text{наб}} = N(T_1 + T_2) = 2NT = MT$, $M=32$) и четырехпачечного сигналов ($N=8$; $T_1=0,00151$ с; $T_2=0,00207$ с; $T_3=0,00248$ с; $T_4=0,00176$ с; $T_{\text{наб}} = N(T_1 + T_2 + T_3 + T_4) = 4NT = MT$, $M=32$). Из них видно, что если при рассогласовании опорного и принимаемого сигналов по частоте в диа-

пазоне (от 0 до 3 кГц) при двухимпульсной пачке $\psi(0, F)/\psi(0, 0) \leq 0,5$, то при четырехимпульсной пачке $\psi(0, F)/\psi(0, 0) < 0,3$, что обеспечивает меньшую вероятность ошибочных решений при нахождении истинной частоты F .

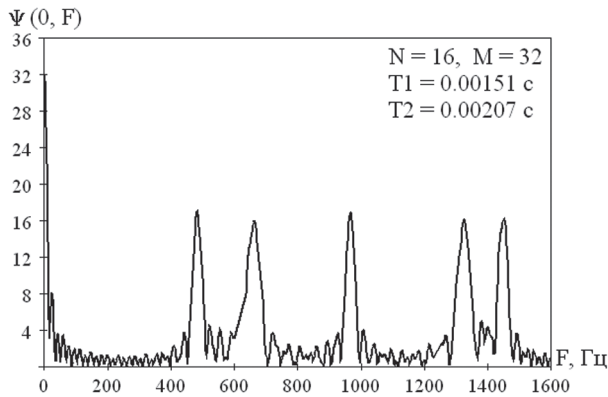


Рис. 1

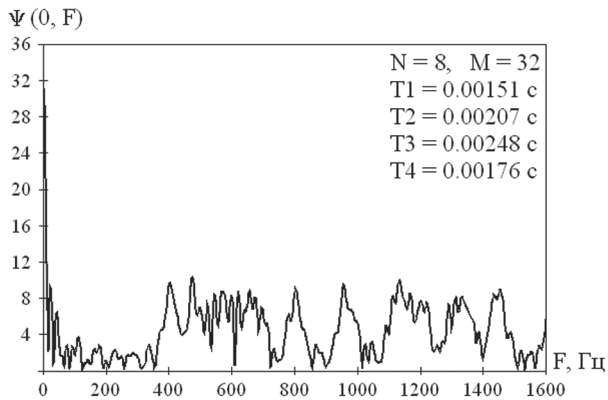


Рис. 2

Очевидно, что при использовании пачки из M когерентных импульсов с различными интервалами между соседними импульсами T_i ($i = \overline{1, M-1}$)

$$S(t) = E_3 [S_a(t) + S_a(t - T_1) + S_a(t - T_1 - T_2) + S_a(t - T_1 - T_2 - T_3) + \dots] \quad (3)$$

$$\dots + S_a(t - T_1 - T_2 - \dots - T_{M-1})] \cdot e^{j(\omega_0 t + \varphi)}$$

относительный уровень боковых лепестков функции рассогласования $\frac{\psi(0, F)}{\psi(0, 0)}$ будет еще меньшим.

Заметим, что уровни боковых лепестков зависят от выбранных значений интервалов T_i и их последовательности.

При приеме сигналов с неизвестными значениями τ и F необходимо для каждой пары значений (τ, F) вычислять $\psi(\tau, F)$ и сравнивать его с порогом. Число таких ячеек P велико $\left(P \approx \frac{T}{\tau_u} F_n T_{\text{наб}} = \frac{T}{\tau_u} F_n M \bar{T} \approx \frac{T}{\tau_u} M \right)$.

Поэтому в статье рассматривается квазиоптимальный метод, при котором РЛС излучает последовательность пачек, в которых периоды повторения когерентных зондирующих импульсов

изменяются от пачки к пачке и составляют T_1 и T_2

$$S_3(t) = \sum_{k=0}^{N-1} E_3 S_a(t - kT) e^{j[\omega_0(t - kT) + \varphi]}.$$

Предполагается, что по каждой из принимаемых пачек метеосигналов $Y(t)$ корреляционным методом находятся доплеровские смещения частоты $\hat{F}_{gi}$ (соответственно радиальные скорости $\hat{V}_{ri}$), а затем по их разности $\hat{F}_{g1} - \hat{F}_{g2}$ (соответственно по $\hat{V}_{r1} - \hat{V}_{r2}$) по найденным в работе соотношениям рассчитывается истинная радиальная скорость V_r .

Пачку метеосигналов от отражателей рассматриваемого импульсного объема можно представить в виде

$$y(t) = \sum_{k=0}^{N-1} y_k(t) S_a[t - kT - \tau_k(t)] e^{j[\omega_0(t - kT - \tau_k(t)) + \varphi]},$$

где $\tau_k(t) = \frac{2R(t)}{c} = \frac{2}{c} [R_0 + V_r t]$ — запаздывание метеосигнала от отражателей рассматриваемого импульсного объема, расстояние до которого в момент начала излучения первого импульса $t = 0$ равно R_0 ;

$$S_a(t) = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 < t < \tau_u, \\ 0 & \text{при } t < 0, t > \tau_u. \end{cases}$$

Тогда выражение для фазы k -го метеосигнала

$$\begin{aligned} \omega_0[t - kT - \tau_k(t)] + \varphi &= \omega_0 \left[t - kT - \frac{2R_0}{c} - \frac{2V_r}{c} t \right] + \varphi = \\ &= (\omega_0 - \Omega)t - \omega_0 kT + \varphi - \frac{2R_0}{c} \omega_0, \end{aligned}$$

$$\text{где } \Omega = \omega_0 \frac{2V_r}{c} = 2\pi \frac{2V_r}{\lambda} = 2\pi F_g.$$

В комплексном виде k -й метеосигнал

$$\dot{y}_k(t) = y_k(t) S_a[t - kT - \tau_k(t)] e^{j[(\omega_0 - \Omega)t - \omega_0 kT + \varphi - \frac{2R_0}{c} \omega_0]};$$

$$\begin{aligned} \dot{y}_{k+1}(t) &= y_{k+1}(t) S_a[t - (k+1)T - \tau_{k+1}(t)] \times \\ &\times e^{j[(\omega_0 - \Omega)t - \omega_0(k+1)T + \varphi - \frac{2R_0}{c} \omega_0]}. \end{aligned}$$

В результате статистического усреднения произведений соседних значений $\dot{y}_k$ и $\dot{y}_{k+1}$ получим следующее выражение для функции междупериодной корреляции

$$\overline{\dot{y}_k^x(t - T) \dot{y}_{k+1}(t)} = \dot{R}_y(T) = |\dot{R}_y(T)| e^{-j\Omega T}.$$

Выборочную функцию междупериодной корреляции через комплексные амплитуды метеосигнала $\dot{Y}_k$ и $\dot{Y}_{k+1}$ можно найти с помощью соотношения

$$\begin{aligned} \hat{R}_Y(T) &= \frac{1}{N-1} \sum_{k=0}^{N-2} \dot{Y}_k^x \dot{Y}_{k+1} = |\hat{R}_Y(T)| e^{-j\hat{\Omega}T} = \\ &= |\hat{R}_Y(T)| \cos \hat{\Omega}T - j |\hat{R}_Y(T)| \sin \hat{\Omega}T = R_c - jR_s. \end{aligned}$$

Откуда $\operatorname{tg} \hat{\Omega} T = \frac{R_s}{R_c}$, а $\hat{\Omega} T = \operatorname{arctg} \frac{R_s}{R_c}$.

Обозначим $\alpha = -\hat{\Omega} T = -2\pi \hat{F}_g T = -2\pi \frac{2\hat{V}_r}{\lambda} T$. (4)

Тогда $\hat{V}_r = -\frac{\alpha}{\pi} \cdot \frac{\lambda}{4T} = -\frac{\alpha}{\pi} \cdot \frac{\lambda}{4} F = -\frac{\alpha}{\pi} \cdot V_H$,

где $V_H = \frac{\lambda}{4} F$ — скорость Найквиста. При такой скорости объект локации за период повторения в радиальном направлении смещается на $\frac{\lambda}{4}$, а набег фазы изменяется на π .

Рассмотрим зависимости рассчитанной по соотношению (4) величины $\hat{\Omega} T$ (и соответственно $\hat{V}_r$) от истинной скорости объекта V_r (и соответственно ΩT).

Когда $0 < V_r < \frac{1}{2} V_H$, то

$$\Omega T = 2\pi F_g T = 2\pi \frac{2V_r}{\lambda} T = \pi \frac{V_r}{V_H}$$

изменяется в пределах $0 < \Omega_g T < \frac{\pi}{2}$, а $0 < \operatorname{tg} \Omega T < \infty$ и соответственно $-\frac{\pi}{2} < -\hat{\Omega}_g T < 0$, $-\frac{V_H}{2} < \hat{V}_r < 0$.

Когда $-\frac{V_H}{2} < V_r < 0$, то $-\frac{\pi}{2} < \Omega_g T < 0$,

$-\infty < \operatorname{tg} \Omega_g T < 0$, а $0 < -\hat{\Omega} T < \frac{\pi}{2}$, $0 < \hat{V}_r < \frac{V_H}{2}$.

Если же ΩT находится вне интервала $(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$, то все равно значения $\operatorname{tg} \Omega T$ и $\operatorname{tg} \hat{\Omega} T$ будут находиться в пределах от $-\infty$ до ∞ . Поэтому во всех случаях для рассчитанных величин $\operatorname{tg} \hat{\Omega} T = \frac{R_s(T)}{R_c(T)}$ измеритель скорости выдает значения $\hat{V}_r$, которые будут в интервале $(-\frac{V_H}{2}, \frac{V_H}{2})$ (табл. 1).

Заметим, что пределы изменения $\hat{V}_r$ для участков $0 < \Omega_g T < \frac{\pi}{2}$ и $\frac{3}{2}\pi < \Omega_g T < 2\pi$ одинаковы.

Однако при нахождении $\Omega_g T$ на первом участке $R_s(T) < 0$, $R_c(T) > 0$, то для участка $\frac{3}{2}\pi < \Omega_g T < \pi$ знаки мнимой и действительной частей $\dot{R}_x(T)$ противоположны ($R_s(T) > 0$, $R_c(T) < 0$).

Кривые зависимостей $\hat{V}_r$ от V_r (рис. 3) для пачек с периодами повторения сигналов T_1 и T_2 отличаются только значениями скоростей Найквиста $\left(V_{H1} = \frac{\lambda}{4T_1}, V_{H2} = \frac{\lambda}{4T_2} \right)$.

Нетрудно показать, что для случая приближения объекта локации к РЛС, когда $V_r = \frac{dR(t)}{dt} < 0$, то $\hat{V}_r(-V_r) = -\hat{V}_r(V_r)$. Левая часть графиков, изображенных на рис. 3, соответствует случаю приближения объекта локации к РЛС.

При квазиоптимальной обработке, как в рассматриваемом случае, для нахождения истинной скорости $\hat{V}_r$ предварительно для разных i -х этапов определяют разности $\Delta i = \hat{V}_{r1} - \hat{V}_{r2}$ (табл. 2). В соответствии с данными табл. 2 построен график зависимости $\Delta i = \hat{V}_{r1} - \hat{V}_{r2} = f(i)$, изображенный на рис. 4. В табл. 2 также приведены найденные в работе соотношения для вычисления $\hat{V}_r = f(\Delta i, \hat{V}_{r1})$.

Значения разностей Δi и соотношения для расчета $\hat{V}_r$, когда радиальная скорость V_r отрицательна, приведены в табл. 3.

На основе анализа данных таблиц можно указать на следующий порядок определения знака и величины радиальной скорости $\hat{V}_r$.

Для найденной разности $\Delta = \hat{V}_{r1} - \hat{V}_{r2}$ находится отношение $\frac{\Delta}{\delta}$.

Таблица 1

№ п/п	V_r	$\Omega_g T = 2\pi \frac{2V_r}{\lambda} T$	$-\hat{\Omega}_g T = \operatorname{arctg} \frac{R_s(t)}{R_c(t)}$	$\hat{V}_r$
1	$0 < V_r < 0,5V_H$	$0 < \Omega_g T < \frac{\pi}{2}$	$-\frac{\pi}{2} < -\hat{\Omega}_g T < 0$	$-0,5V_H < \hat{V}_r < 0$
2	$0,5V_H < V_r < V_H$	$\frac{\pi}{2} < \Omega_g T < \pi$	$0 < -\hat{\Omega}_g T < \frac{\pi}{2}$	$0 < \hat{V}_r < 0,5V_H$
3	$V_H < V_r < 1,5V_H$	$\pi < \Omega_g T < \frac{3}{2}\pi$	$-\frac{\pi}{2} < -\hat{\Omega}_g T < 0$	$-0,5V_H < \hat{V}_r < 0$
4	$1,5V_H < V_r < 2V_H$	$\frac{3}{2}\pi < \Omega_g T < 2\pi$	$-2\pi < -\hat{\Omega}_g T < \frac{3}{2}\pi \left(0 < -\hat{\Omega}_g T < \frac{\pi}{2} \right)$	$0 < \hat{V}_r < 0,5V_H$
5	$2V_H < V_r < 2,5V_H$	$2\pi < \Omega_g T < \frac{5}{2}\pi$	$-\frac{\pi}{2} < -\hat{\Omega}_g T < 0$	$-0,5V_H < \hat{V}_r < 0$

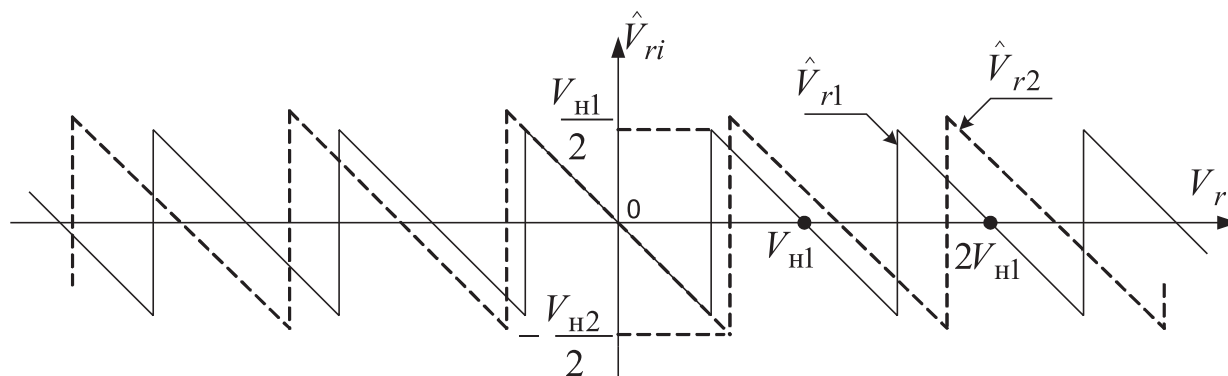


Рис. 3

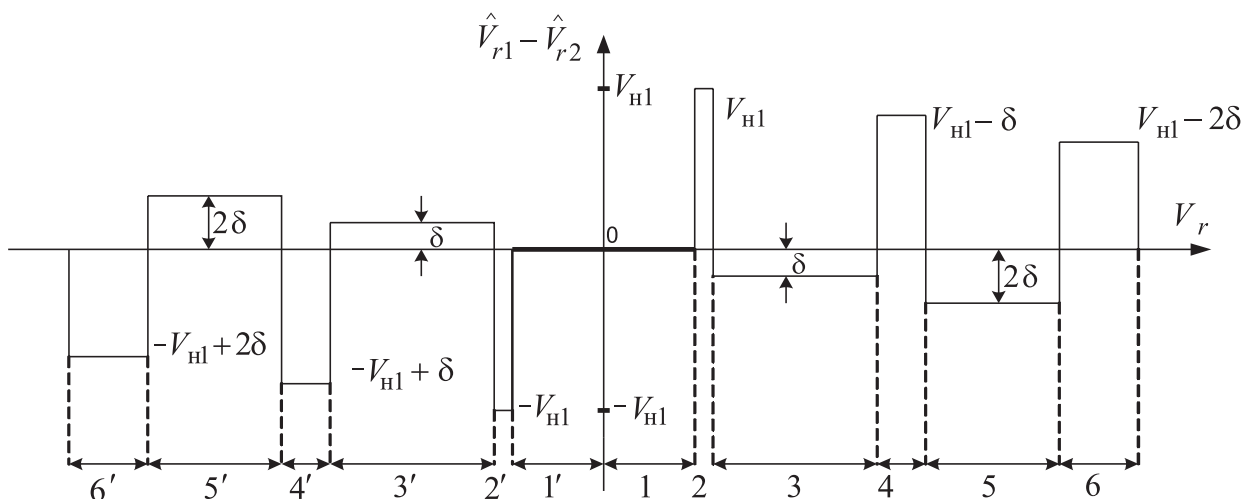


Рис. 4

Таблица 2

№ этапа	Границы этапа	$\Delta i = \hat{V}_{r1} - \hat{V}_{r2}$	Оценка реальной скорости $\hat{V}_r = f(\Delta i, \hat{V}_{r1})$
1	$0 < V_r < \frac{1}{2}V_{H1}$	$\Delta_1 = \hat{V}_{r1} - V_{r2} = 0$	$\hat{V}_r = -\hat{V}_{r1} = -V_{H1} \frac{\Delta_1}{\delta} - \hat{V}_{r1}$
2	$\frac{1}{2}V_{H1} < V_r < \frac{1}{2}V_{H2}$	$\Delta_2 = V_{H1} > 0$	$\hat{V}_r = V_{H1} - \hat{V}_{r1} = V_{H1} \left[\frac{V_{H1} - \Delta_2}{\delta} + 1 \right] - \hat{V}_{r1}$
3	$\frac{1}{2}V_{H2} < V_r < \frac{3}{2}V_{H1}$	$\Delta_3 = V_{H1} - V_{H2} = -\delta < 0$	$\hat{V}_r = V_{H1} - \hat{V}_{r1} = -V_{H1} \frac{\Delta_3}{\delta} - \hat{V}_{r1}$
4	$\frac{3}{2}V_{H1} < V_r < \frac{3}{2}V_{H2}$	$\Delta_4 = V_{H1} - \delta > 0$	$V_r = 2V_{H1} - \hat{V}_{r1} = V_{H1} \left[\frac{V_{H1} - \Delta_4}{\delta} + 1 \right] - \hat{V}_{r1}$
5	$\frac{3}{2}V_{H2} < V_r < \frac{5}{2}V_{H1}$	$\Delta_5 = -2\delta < 0$	$V_r = 2V_{H1} - \hat{V}_{r1} = -V_{H1} \frac{\Delta_5}{\delta} - \hat{V}_{r1}$
6	$\frac{5}{2}V_{H1} < V_r < \frac{5}{2}V_{H2}$	$\Delta_6 = V_{H1} - 2\delta > 0$	$V_r = 3V_{H1} - \hat{V}_{r1} = V_{H1} \left[\frac{V_{H1} - \Delta_6}{\delta} + 1 \right] - \hat{V}_{r1}$
7	$\frac{5}{2}V_{H2} < V_r < \frac{7}{2}V_{H1}$	$\Delta_7 = -3\delta < 0$	$V_r = 3V_{H1} - \hat{V}_{r1} = -V_{H1} \frac{\Delta_7}{\delta} - \hat{V}_{r1}$
2k	$\frac{2k-1}{2}V_{H1} < V_r < \frac{2k-1}{2}V_{H2}$	$\Delta_{2k} = V_{H1} - (k-1)\delta > 0$	$\hat{V}_r = kV_{H1} - \hat{V}_{r1} = V_{H1} \left[\frac{V_{H1} - \Delta_{2k}}{\delta} + 1 \right] - \hat{V}_{r1}$
2k+1	$\frac{2k-1}{2}V_{H2} < V_r < \frac{2k+1}{2}V_{H1}$	$\Delta_{2k+1} = -k\delta$	$\hat{V}_r = kV_{H1} - \hat{V}_{r1} = -V_{H1} \frac{\Delta_{2k+1}}{\delta} - \hat{V}_{r1}$

1. Если $\Delta < 0$ и оказалось, что $\frac{\Delta}{\delta} = -k$, где k – целое число ($k = 1, 2, \dots$), то знак скорости положителен, а ее величина находится по соотношению $\hat{V}_r = -V_{H1} \frac{\Delta}{\delta} - \hat{V}_{r1} = kV_{H1} - \hat{V}_{r1}$.

Если же $\frac{\Delta}{\delta}$ не равно целому числу, то знак скорости V_r отрицателен, а ее величина $\hat{V}_r = -V_{H1} \left[\frac{V_{H1} + \Delta}{\delta} + 1 \right] - \hat{V}_{r1}$.

2. Если найденная разность $\Delta > 0$ и оказалось, что $\frac{\Delta}{\delta} = k$, где k – целое число, то знак скорости $\hat{V}_r$ отрицателен, а ее величина $\hat{V}_r = -V_{H1} \frac{\Delta}{\delta} - \hat{V}_{r1} = -kV_{H1} - \hat{V}_{r1}$.

Если же $\frac{\Delta}{\delta}$ не равно целому числу, то знак скорости V_r положителен, а ее величина $\hat{V}_r = V_{H1} \left[\frac{V_{H1} - \Delta}{\delta} + 1 \right] - \hat{V}_{r1}$.

Очевидно, при использовании указанного правила определение $\hat{V}_r$ возможно, если $\left| \frac{V_{H1}}{\delta} \right|$ не равно целому числу, так как в противном случае всякий раз $\frac{\Delta}{\delta} = \frac{V_{H1} - k\delta}{\delta} = \frac{V_{H1}}{\delta} - k$ будет равно це-

лому числу. Поэтому $\frac{V_{H1}}{\delta}$ в оптимальном случае должно отличаться от целого числа на $\frac{1}{2}$, то есть

$$\frac{V_{H1}}{\delta_{\text{опт}}} = e - \frac{1}{2}, \quad (5)$$

где e – целое число.

Найдем оптимальное значение F_{H2} , при котором при выбранных значениях λ и F_{H1} $\delta = V_{H2} - V_{H1} = \frac{\lambda}{4}(F_{H2} - F_{H1}) = \delta_{\text{опт}}$.

Как это видно из табл. 2, для однозначного определения скорости $V_{H1} - k_{\text{max}} \cdot \delta$ не должно быть отрицательным, то есть $k_{\text{max}} \leq \frac{V_{H1}}{\delta}$.

Кроме того, целая часть отношения максимальной скорости V_m к скорости Найквиста

$$\left| \frac{V_m}{V_{H1}} \right| = B \text{ должна быть меньше } k_m.$$

$$\text{С учетом (5)} \quad B - \frac{1}{2} = \frac{V_{H1}}{\delta_{\text{опт}}}.$$

$$\text{Тогда } \delta_{\text{опт}} = \frac{V_{H1}}{B - \frac{1}{2}} = V_{H2} - V_{H1},$$

$$\text{а } V_{H2} = V_{H1} \left[1 + \frac{1}{B - \frac{1}{2}} \right] \text{ или } F_{H2} = F_{H1} \left[1 + \frac{1}{B - \frac{1}{2}} \right].$$

Таблица 3

№ этапа	Границы этапа	$\Delta i = \hat{V}_{r1} - \hat{V}_{r2}$	Оценка реальной скорости $\hat{V}_r = f(\Delta i, \hat{V}_{r1})$
1'	$\frac{V_{H1}}{2} < V_r < 0$ ($-\frac{\pi}{2} < \alpha < 0, \hat{V}_r > 0$)	$\Delta_1 = 0$	$\hat{V}_r = -V_{r1} = -V_{H1} \frac{\Delta_1}{\delta} - \hat{V}_{r1}$
2'	$-\frac{1}{2}V_{H2} < V_r < \frac{1}{2}V_{H1}$ ($\alpha > 0, \hat{V}_{r1} < 0$)	$\Delta_2 = -V_{H1}$	$\hat{V}_r = -V_{H1} - \hat{V}_{r1} = -V_{H1} \left[\frac{V_{H1} + \Delta_2}{\delta} + 1 \right] - \hat{V}_{r1}$
3'	$-\frac{3}{2}V_{H1} < V_r < \frac{V_{H2}}{2}$	$\Delta_3 = V_{H2} - V_{H1} = \delta$	$\hat{V}_r = -V_{H1} - \hat{V}_{r1} = -V_{H1} \frac{\Delta_3}{\delta} - \hat{V}_{r1}$
4'	$-\frac{3}{2}V_{H2} < V_r < \frac{3}{2}V_{H1}$	$\Delta_4 = -V_{H1} + \delta$	$\hat{V}_r = -2V_{H1} - \hat{V}_{r1} = -V_{H1} \left[\frac{V_{H1} + \Delta_4}{\delta} + 1 \right] - \hat{V}_{r1}$
5'	$-\frac{5}{2}V_{H1} < V_r < -\frac{3}{2}V_{H2}$	$\Delta_5 = 2\delta$	$\hat{V}_r = -2V_{H1} - \hat{V}_{r1} = -V_{H1} \frac{\Delta_5}{\delta} - \hat{V}_{r1}$
6'	$-\frac{5}{2}V_{H2} < V_r < -\frac{5}{2}V_{H1}$	$\Delta_6 = -V_{H1} + 2\delta$	$\hat{V}_r = -3V_{H1} - \hat{V}_{r1} = -V_{H1} \left[\frac{V_{H1} + \Delta_6}{\delta} + 1 \right] - \hat{V}_{r1}$
7'	$-\frac{7}{2}V_{H1} < V_r < \frac{5}{2}V_{H2}$	$\Delta_7 = 3\delta$	$\hat{V}_r = -3V_{H1} - \hat{V}_{r1} = -V_{H1} \frac{\Delta_7}{\delta} - \hat{V}_{r1}$
2k	V_r	$\Delta_{2k} = -V_{H1} + (k-1)\delta$	$\hat{V}_r = -kV_{H1} - \hat{V}_{r1} = -V_{H1} \left[\frac{V_{H1} + \Delta_{2k}}{\delta} + 1 \right] - \hat{V}_{r1}$
2k+1		$\Delta_{2k+1} = k\delta$	$\hat{V}_r = -kV_{H1} - \hat{V}_{r1} = -V_{H1} \frac{\Delta_{2k+1}}{\delta} - \hat{V}_{r1}$

Рассмотрим возможности реализации анализируемого метода измерения скорости ветра с учетом погрешностей измерения $\hat{V}_{ri}$ (а соответственно и $\Delta = \hat{V}_{r1} - \hat{V}_{r2}$), обусловленных действием шумов, нестабильностями аппаратуры, статистическими свойствами метеосигналов, из-за чего $\frac{\Delta}{\delta}$ отличается от истинного значения на ϵ .

Очевидно, чтобы надежно относить $\frac{\Delta}{\delta}$ к целому значению k или к $k \pm \frac{1}{2}$, погрешность

$$\epsilon = \left| \frac{\hat{V}_{r1} - \hat{V}_{r2}}{\delta} - \frac{V_{r1} - V_{r2}}{\delta} \right| = \left| \frac{V_{r1} + \Delta V_1 - (V_{r2} + \Delta V_2)}{\delta} - \frac{V_{r1} - V_{r2}}{\delta} \right| = \left| \frac{\Delta V_1 - \Delta V_2}{\delta} \right|$$

не должна быть большей $\frac{1}{8}$, то есть $\epsilon \leq \frac{1}{8}$. Тогда абсолютная погрешность разности $|\Delta V_1 - \Delta V_2|$ должна быть меньше $\frac{1}{8}\delta = \frac{1}{8}(V_{n2} - V_{n1}) = \frac{\lambda}{32}(F_{n2} - F_{n1})$. Так, например, при $\lambda = 6$ см; $F_{n1} = 1200$ Гц, $V_{n1} = \frac{\lambda}{4}F_{n1} =$

$= 18$ м/с, $V_{\max} = 50$ м/с, $B = \frac{V_{\max}}{V_{n1}} = 3$. Тогда опти-

мальное значение $F_{n2} = F_{n1} \left(1 + \frac{1}{B - \frac{1}{2}} \right) = 1680$ Гц,

а допустимая погрешность разности $\hat{V}_{r1} - \hat{V}_{r2}$

должна быть меньше $\frac{1}{8}\delta = \frac{\lambda}{32}(F_{n2} - F_{n1}) = 0,9$ м/с.

Однако требование к допустимой погрешности может оказаться жестким при малых значениях длины волны и частоты повторения.

Основные результаты изложенного материала в следующем:

1. Показано, что реализация предложенного метода позволяет сравнительно просто однозначно определять знак и величину скорости ветра.

2. Получены соотношения для нахождения оптимальной второй частоты повторения F_{n2} при выбранных первой частоте повторения и длине волны.

3. Определена допустимая погрешность разности радиальных скоростей, находимых по первой и второй пачкам, при которых рассматриваемый измеритель скорости ветра работоспособен.

4. С учетом развития микропроцессорной техники можно считать перспективным использование многоканальных систем оптимальной обработки пачек когерентных радиоимпульсов (3), обеспечивающих обнаружение и однозначное измерение дальности скорости объектов локации.

Литература.

[1] Теоретические основы радиолокации / Под ред. Ширмана Я.Д. — М.: Сов. радио, 1970. — 328 с.

Поступила в редколлегию 8.04.2007



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