

## ЛИТЕРАТУРА

1. Nazarathy M., Shamir I. Fourier optics described by operator algebra.— JOSA, 1980, vol. 70, N 2.
2. Стейн И., Вейс Г. Введение в гармонический анализ на евклидовых пространствах.— М.: Мир, 1976.
3. Маркушевич А. И. Теория аналитических функций.— М.: Наука, 1967.

*Поступила в редакцию 30 октября 1981 г.;  
окончательный вариант — 14 июня 1983 г.*

УДК 621.391.24 : 533.6.071

**А. Н. МОРГУНОВ, Н. И. НАГОРНАЯ**  
(Рязань)

### ВОПРОСЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛА ЛДИСа АВТОМАТИЧЕСКИМ УПРАВЛЯЕМЫМ ФИЛЬТРОМ

**Введение.** Автоматический управляемый фильтр (АУФ) представляет собой многоканальную систему, осуществляющую операции слежения за доплеровским сдвигом частоты и выделения полезной составляющей входного сигнала лазерного доплеровского измерителя скорости (ЛДИС). Один из первых вариантов технической реализации устройства обработки доплеровского сигнала с полуавтоматической системой АУФ был предложен в работе [1]. Обобщенная функциональная схема АУФ представлена на рис. 1. Каждый из  $N$  каналов включает в себя фильтрующий элемент  $1-1 \div 1-N$  и нормально закрытый ключ  $2-1 \div 2-N$ . Сигналы с выходов фильтров поступают на управляющее устройство 3, которое открывает ключ, если в соответствующем канале существует доплеровский сигнал. После прохождения ключа сигнал поступает на объединитель каналов 4 и через него на выход АУФ.

Доплеровский сигнал в одночастичном режиме является последовательностью радиоимпульсов, каждый из которых может обрабатываться отдельно [2]. Доплеровский импульс, воздействующий на АУФ, представляет собой аддитивную смесь полезной  $S(t)$ , помеховой  $n_s(t)$  и шумовой  $\psi(t)$  составляющих. Полезная и помеховая составляющие доплеровского сигнала импульса могут быть определены [2, 3] детерминированными функциями со случайными параметрами:

$$S(t) = A \exp \{-\alpha^2 t^2\} \cos \omega_d t; \quad (1)$$

$$n_s(t) = (1 + \varepsilon) A \exp \{-\alpha^2 t^2\}. \quad (2)$$

Здесь  $A$  и  $\alpha$  — случайные от импульса к импульсу параметры, зависящие от координаты входа аэрозольной частицы в измерительный объем;  $\omega_d$  — доплеровский сдвиг частоты;  $m = 1/(1 + \varepsilon)$  — коэффициент видности [4] интерференционной картины в измерительном объеме. Шумовая составляющая обусловлена рядом факторов, среди которых следует отметить дробовой шум фотоэлектронного умножителя [2, 3], фазовый шум [5] и доплеровский фон [6].

В работах [7, 8] с учетом комплексного действия помех обосновывается построение канальных фильтров АУФ с передаточной функцией вида

$$K(j\omega) = \omega_c k_\Phi \beta_\Phi / [\omega_c \beta_\Phi + j(\omega - \omega_c)], \quad (3)$$

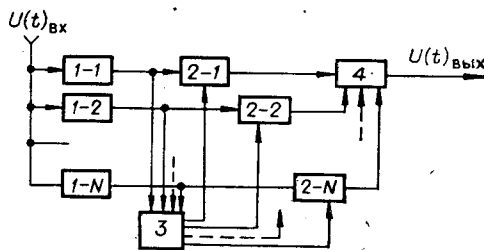


Рис. 1.

где  $k_\Phi$  — коэффициент передачи фильтра;  $\beta_\Phi$  — относительная ширина полосы фильтра по уровню 0,707;  $\omega_c$  — частота настройки фильтра.

Цель настоящей работы — установление аналитических закономерностей, позволяющих оценить широкополосность каналов АУФ и точность воспроизведения частоты доплеровского сигнального импульса отдельным каналом, а также время открытия канала.

**Оценка широкополосности каналов АУФ.** Широкополосность канала АУФ определена допустимым частотным смещением колебаний полезной составляющей доплеровского сигнала от частоты настройки канального фильтра. Входной сигнал действует одновременно на все каналы АУФ. Поэтому возникают отклики не только в канале, частота настройки которого соответствует доплеровскому сдвигу частоты, но и в каналах, настроенных на более низкие частоты. Эти низкочастотные отклики являются помехой при пороговом обнаружении полезной высокочастотной составляющей. Если огибающая помеховых откликов превысит пороговый уровень раньше, чем огибающая полезного сигнала, то произойдет захват сигнала по низкочастотному каналу и полезный сигнал будет потерян. Поэтому широкополосность канала АУФ ограничена условием снижения отношения уровня огибающих полезного и помехового откликов до единицы.

Используя соотношения (1), (3) и известную [8] взаимосвязь между входным и выходным сигналами линейной системы, получаем следующую зависимость для отклика канального фильтра, настроенного на частоту  $\omega_c$ :

$$S(t)_\Phi = \frac{\sqrt{\pi} \omega_c \beta_\Phi k_\Phi}{4\alpha} e^{-\alpha^2 t^2} \exp\left(\frac{\omega_c \beta_\Phi - 2\alpha^2 t + j\Delta\omega}{2\alpha}\right)^2 \times \\ \times \left[1 - \Phi\left(\frac{\omega_c \beta_\Phi - 2\alpha^2 t + j\Delta\omega}{2\alpha}\right)\right] \exp[j(\omega_c + \Delta\omega)t], \quad (4)$$

где  $\Phi(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt$  — интеграл вероятностей,  $\omega_d = \omega_c + \Delta\omega$ .

Отклик канального фильтра, настроенного на частоту  $\omega_c/n$  ( $n = 2, \dots$ ), найдем, используя соотношения (2) и (3) с заменой в последнем  $\omega_c$  на  $\omega_c/n$ . Получаем

$$\Pi(t) = (1 + \varepsilon) \frac{\sqrt{\pi} (\omega_c/n) \beta_\Phi k_\Phi}{2\alpha} e^{-\alpha^2 t^2} \exp\left(\frac{(\omega_c/n) \beta_\Phi - 2\alpha^2 t - j(\omega_c/n)}{2\alpha}\right)^2 \times \\ \times \left[1 - \Phi\left(\frac{(\omega_c/n) \beta_\Phi - 2\alpha^2 t - j(\omega_c/n)}{2\alpha}\right)\right]. \quad (5)$$

Записав интеграл ошибок от комплексного аргумента в виде суммы действительной  $\text{Re}$  и мнимой  $\text{Im}$  составляющих

$$\Phi(z) = \text{Re} \Phi(z) + j \text{Im} \Phi(z),$$

получаем с учетом соотношений (4) и (5) следующее выражение для отношения огибающих откликов полезного и помехового сигналов:

$$q_A(t) = \frac{A_s(t)}{A_n(t)} = \frac{n}{2(1 + \varepsilon)} \exp\left[\frac{(\omega_c^2/h^2) - \Delta\omega^2 - 4t\alpha^2 \omega_c \beta_\Phi (1-1/n) + \omega_c^2 \beta_\Phi^2 (1-1/n^2)}{4\alpha^2}\right] \times \\ \times \sqrt{\frac{[1 - \text{Re} \Phi(z_1)]^2 + [\text{Im} \Phi(z_1)]^2}{[1 - \text{Re} \Phi(z_2)]^2 + [\text{Im} \Phi(z_2)]^2}}, \quad (6)$$

где  $z_1 = (\omega_c \beta_\Phi - 2\alpha^2 t)/2\alpha + j(\Delta\omega/2\alpha)$ ,  $z_2 = [(\omega_c/n) \beta_\Phi - 2\alpha^2 t]/2\alpha - j(\omega_c/n2\alpha)$ .

Зависимость (6) показывает, что с ростом  $t$  отношение огибающих откликов полезного и помехового сигналов монотонно убывает. Однако анализ этого отношения следует проводить на временном интервале  $t \in [-\infty, 0]$ , так как к моменту  $t = 0$  огибающие входного сигнала,

согласно (1) и (2), достигают своего максимального уровня и управляющим устройством  $\mathcal{Z}$  (см. рис. 1) уже принимается решение о наличии полезного сигнала. Поэтому для срабатывания системы по низкочастотным помеховым откликам уровень их огибающей должен превышать уровень огибающей полезного сигнала до момента  $t = 0$ . Если в этот момент обеспечивается условие  $q_A(0) \geq 1$ , то система гарантированно срабатывает по полезному сигналу. Функцию  $q_A = q_A(0)$  будем называть отношением сигнал/помеха по откликам.

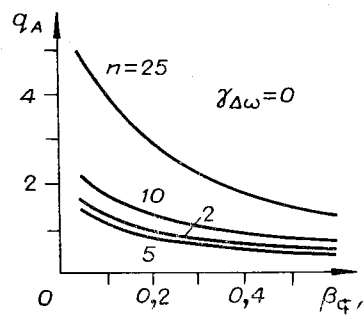


Рис. 2.

С использованием таблиц [9] функции  $w(z)$  проведены расчеты значений  $q_A$  для различных  $\beta_\Phi$ ,  $n$  и  $\gamma_{\Delta\omega} = \Delta\omega/\omega_c$  при типовых для аэродинамического эксперимента значениях относительной широкополосности доплеровского сигнального импульса  $\xi_c = \alpha_c/\omega_c = 0,1$  и коэффициента модуляции  $m = 0,5$ . Результаты расчетов представлены графиками на рис. 2—5.

Анализируя графические зависимости, можно отметить следующее. При фиксированном номере  $n$  канала АУФ, в котором наблюдается отклик на помеховый сигнал по отношению к каналу, воспринимающему полезный сигнал, с ростом широкополосности  $\beta_\Phi$  канального фильтра и частотной расстройки  $\Delta\omega$  отношение сигнал/помеха по откликам уменьшается.

Если фиксирована широкополосность  $\beta_\Phi$  канального фильтра АУФ, то существует канал с частотой настройки  $\omega_c/n_0$ , для которого отношение сигнал/помеха по откликам минимально. При  $\xi_c = 0,1$  это канал, определенный значением  $n_0 = 5$ . Минимум  $q_A$  не критичен к  $n$  в диапазоне  $n = 2 \div 5$ . Физическая сущность минимума  $q_A$  для канала с частотой настройки  $\omega_c/n_0$  состоит в том, что в полосу этого канала попадает наибольшая доля спектральной плотности мощности помеховой составляющей доплеровского сигнального импульса.

Когда в многоканальной системе АУФ обеспечено выполнение условия  $q_A \geq 1$  для канала с частотой настройки  $\omega_c/n_0$ , то в каналах со значениями  $n > n_0$  условие  $q_A > 1$  будет выполняться автоматически.

Широкополосность каналов АУФ  $\beta_k = 2\gamma_{\Delta\omega_{\max}}$  определена максимально допустимой относительной частотной расстройкой  $\gamma_{\Delta\omega_{\max}}$ , при которой  $q_A = 1$  в канале с собственной частотой  $\omega_c/n_0$ .

Практически целесообразно при  $n = n_0$  выбирать  $\gamma_{\Delta\omega_{\max}}$  по уровню  $q_A = 1$  так, чтобы  $\gamma_{\Delta\omega_{\max}} = \beta_\Phi$ . Тогда для  $m = 0,5$  и  $\xi_c = 0,1$  получаем, что  $n_0 = 5$ ,  $\gamma_{\Delta\omega_{\max}} = \beta_\Phi = 0,11$  и требуемая широкополосность каналов АУФ не более 22%.

Если  $m \approx 0,5$ , то для нахождения соответствующих зависимостей достаточно изменить масштаб графиков, приведенных на рис. 2—5, по оси ординат в  $2m$  раз. При этом изменятся и требования к широкополосности канальных фильтров АУФ.

Изменения  $\xi_c$  при сохранении качественного характера зависимостей приводят к количественным изменениям значений  $q_A$ . Соответствующие расчеты всегда можно выполнить на основе соотношения (6). Методика расчета числа каналов АУФ и параметров канальных фильтров изложена в работе [10].

**Оценка точности воспроизведения доплеровского сдвига частоты.** Отклик канального фильтра на доплеровский сигнальный импульс при смещении доплеровского сдвига частоты относительно частоты настройки фильтра связан с процессом установления частоты колебаний в выходном сигнале фильтра. При этом частота колебаний выходного сигнала стремится к доплеровскому сдвигу частоты с увеличением длительности входного доплеровского сигнального импульса. Поэтому точность

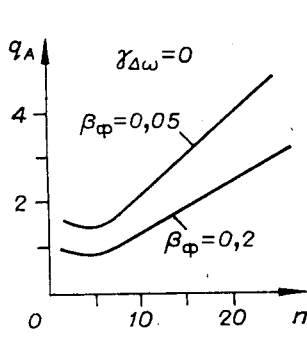


Рис. 3.

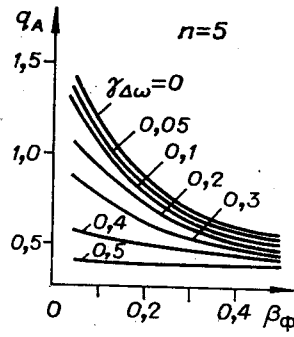


Рис. 4.

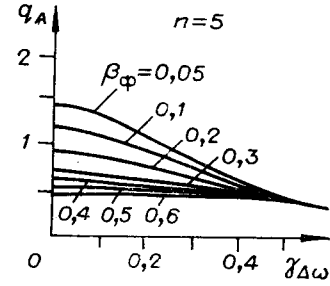


Рис. 5.

измерений скорости при одночастичном режиме не может быть выше точности воспроизведения доплеровского сдвига частоты канальным фильтром АУФ.

Используя соотношение (4), можно показать [11], что относительная точность воспроизведения доплеровского сдвига частот

$$\delta\omega_{\text{д}} = \frac{1}{1 + \gamma_{\Delta\omega}} \frac{\gamma_{\Delta\omega}}{8\pi^2 \xi_c^2 k^2},$$

где  $k$  — число периодов высокочастотного колебания в доплеровском сигнальном импульсе.

В силу случайности координат входа аэрозольной частицы в измерительный объем при постоянном, заранее установленном для заданного режима работы системы обработке пороге срабатывания (в пределах этого порога чувствительности) случайным оказывается число  $k$ . Кроме того, частотное смещение  $\gamma_{\Delta\omega}$  от импульса к импульсу в потоке может быть также величиной случайной. Полагая, что указанное смещение распределено равномерно в пределах относительной ширины канала  $\beta_{\kappa}$ , и используя распределение  $W(k)$ , полученное в работе [12] при  $\gamma_{\Delta\omega} = \text{const}$ , имеем

$$\langle \delta\omega_{\text{д}} \rangle_{\kappa} = \int_{k_{\text{min}}}^{k_{\text{max}}} \delta\omega_{\text{д}} W(k) dk = \frac{\gamma_{\Delta\omega}}{(1 + \gamma_{\Delta\omega}) 8\pi^2 \xi_c^2} \frac{\ln(k_{\text{max}}/k_{\text{min}} + \sqrt{k_{\text{max}}^2/k_{\text{min}}^2 - 1})}{k_{\text{min}}^2 (k_{\text{max}}/k_{\text{min}})^2}. \quad (7)$$

При одновременном учете случайного характера значений  $k$  и  $\gamma_{\Delta\omega}$  получаем

$$\langle \delta\omega_{\text{д}} \rangle_{\kappa, \gamma} = \int_0^{\gamma_{\Delta\omega_{\text{K}}}} \langle \delta\omega_{\text{д}} \rangle_{\kappa} W(\gamma_{\Delta\omega}) d\gamma_{\Delta\omega} = \frac{\ln(k_{\text{max}}/k_{\text{min}} + \sqrt{k_{\text{max}}^2/k_{\text{min}}^2 - 1})}{8\pi^2 \xi_c^2 k_{\text{max}}^2} \times \left[ 1 - \frac{\ln(1 + \gamma_{\Delta\omega_{\text{K}}})}{\gamma_{\Delta\omega_{\text{K}}}} \right]. \quad (8)$$

Влияние усреднения по  $\gamma_{\Delta\omega}$  на точность воспроизведения доплеровского сдвига частоты канальным фильтром АУФ можно оценить отношением

$$\frac{\langle \delta\omega_{\text{д}} \rangle_{\kappa, \gamma}}{\langle \delta\omega_{\text{д}} \rangle_{\kappa} | \gamma = \gamma_{\Delta\omega_{\text{K}}}} = \frac{1 - [\ln(1 + \gamma_{\Delta\omega_{\text{K}}})]/\gamma_{\Delta\omega_{\text{K}}}}{\gamma_{\Delta\omega_{\text{K}}}/(1 + \gamma_{\Delta\omega_{\text{K}}})}. \quad (9)$$

Графики зависимостей (7) и (9) приведены на рис. 6, 7. Из этих рисунков видно, что если число колебаний в доплеровском сигнальном импульсе не менее 10, то точность воспроизведения доплеровского сдвига частоты канальным фильтром АУФ не хуже 0,05%.

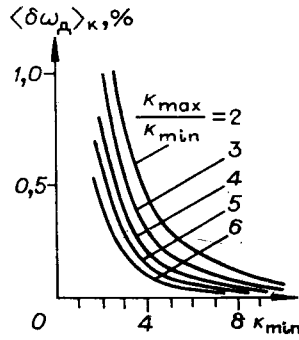


Рис. 6.

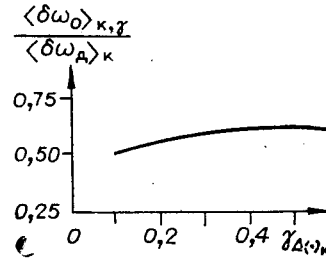


Рис. 7.

Заметим, что приведенная в работе [13] оценка точности воспроизведения доплеровского сдвига частоты линейным фильтром справедлива при рассмотрении входного полезного воздействия как потока, определенного только спектральной плотностью мощности, и не учитывает временной структуры доплеровского сигнального импульса.

**Временное удлинение строба, открывающего ключ канала.** Входной сигнал вызывает отклики в каналах, частота настройки которых  $\omega_c/n$  ( $n = 2, 3, \dots$ ) ниже доплеровского сдвига частоты полезного сигнала, воспринимаемого каналом, настроенным на частоту  $\omega_c$ . Поэтому отклики НЧ-каналов после обработки полезного сигнала могут пройти на выход системы. Для устранения этого используется соответствующее схемное решение [14], обеспечивающее временное удлинение строба, управляющего каналом. Оценим необходимое временное удлинение строба.

На основании соотношения (5) определим частоту колебаний помехового отклика для различных  $\beta_\Phi$  при  $n = 5$  и покажем, что относительные отклонения частоты колебаний помехового отклика от частоты настройки канального фильтра ничтожно малы.

Относительное затухание колебаний отклика  $\gamma_n(t) = A_n(t)/A_n(0)$  на основе выражения (5) с учетом обозначений  $t = (2k\pi)/\omega_c$  и  $\xi = \alpha/\omega_c n = \xi_c$  определено зависимостью

$$\gamma_n(k) = e^{-2\pi\beta_\Phi k} \sqrt{\frac{[1 - \Phi(\beta_\Phi/2n\xi - 2\pi kn\xi)]^2 + (1/\pi n^2 \xi^2) \exp[-(\beta_\Phi/2n\xi - 2\pi kn\xi)^2]}{[1 - \Phi(\beta_\Phi/2n\xi)]^2 + (1/\pi n^2 \xi^2) \exp[-(\beta_\Phi/2n\xi)^2]}}. \quad (10)$$

Графики зависимости (10) для  $\xi = 0,1$ ,  $n = 5$  приведены на рис. 8.

Имея пороговый уровень  $\gamma_{пор}$ , можно установить количество колебаний помехового отклика, после которых отклик не будет восприниматься анализируемой системой  $\mathcal{Z}$  (см. рис. 1). Пусть  $\gamma_{пор}$  соответствует  $k_{пор}$ , тогда временное удлинение канальных стробов  $T_{удл} = nk_{пор}T_c$ , где  $T_c$  — период колебаний доплеровского сдвига частоты.

Так как максимальный уровень отклика имеет место при  $n = n_0$ , то

$$T_{удл} = n_0 k_{пор} T_c. \quad (11)$$

Пороговый уровень по помеховому отклику  $\gamma_{пор} = \kappa \gamma_{с.пор}$ , где  $\gamma_{с.пор}$  — относительный пороговый уровень по полезному сигналу (определен системой анализа);  $\kappa$  — коэффициент, учитывающий превышение полезного сигнала над помеховым откликом. В соответствии с зависимостью (6), полагая  $t = 0$  и  $\Delta\omega = 0$ , получаем

$$\kappa = \frac{n}{2(1+\epsilon)} \exp\left[\frac{\beta_\Phi^2 (n^2 - 1) + 1}{4n^2 \xi^2}\right] \sqrt{\frac{[1 - \Phi(\beta_\Phi/2\xi)]^2}{[1 - \Phi(\beta_\Phi/2n\xi)]^2 + (1/\pi n^2 \xi) \exp(\beta_\Phi^2/2n^2 \xi^2)}}. \quad (12)$$

График зависимости  $\kappa(\beta_\Phi)$  для  $n = 5$  и  $\xi = 0,1$  приведен на рис. 9.

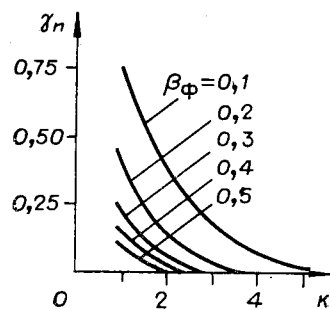


Рис. 8.

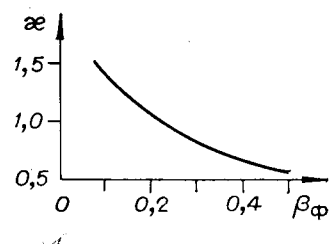


Рис. 9.

**Заключение.** Проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что при соответствующей разработке автоматических управляемых фильтров могут быть созданы ЛДИСы для аэродинамических исследований в широком диапазоне скоростей потока, обеспечивающие высокую точность измерений в одночастичном режиме работы с оценкой доплеровского сдвига частоты по каждому сигнальному импульсу.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дубнищев Ю. Н. и др. Устройство для обработки сигналов доплеровского измерителя скорости. (Автор. свид-во № 413893).— БИ, 1974, № 33.
2. Гроздовский Г. Л. Анализ точности измерителей ЛДИСа.— В кн.: Лазерное доплеровское измерение скорости газовых потоков: Труды ЦАГИ. М., 1976, вып. 1750.
3. Лазерные доплеровские измерители скорости/Под ред. чл.-кор. АН СССР Ю. Е. Нестерихина.— М.: Наука, 1975.
4. Ринкевичус Б. С. Лазерная анемометрия.— М.: Энергия, 1978.
5. Соболев В. С. О спектре «фазового» шума на выходе ЛДИС.— В кн.: Когерентно-оптические доплеровские устройства в гидроаэродинамическом эксперименте. Новосибирск: ИАиЭ СО АН СССР, 1974.
6. Моргунов А. Н., Нелидкин А. М. О помехах при доплеровском методе измерения локальных скоростей с помощью лазеров.— В кн.: Вопросы анализа и синтеза радиосигналов и их обработка. Рязань: РРТИ, 1977, вып. 2.
7. Ванюшин В. И., Моргунов А. Н., Нагорная Н. И. Оценка частотного месторасположения спектра сигнала ЛДИСа.— В кн.: Лазерное доплеровское измерение скорости газовых потоков: Труды ЦАГИ. М., 1976, вып. 1750.
8. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы.— М.: Сов. радио, 1966.
9. Справочник по специальным функциям/Под ред. М. Абрамовица и И. Стигана.— М.: Наука, 1979.
10. Нагорная Н. И., Моргунов А. Н. К оценке широкополосности канала автоматического управляемого фильтра ЛДИСа.— В кн.: Радиоэлектронные устройства. Рязань: РРТИ, 1977, вып. 2.
11. Нагорная Н. И., Моргунов А. Н. Об изменении частоты сигнала ЛДИСа при его частотном перемещении по каналу автоматического управляемого фильтра.— В кн.: Вопросы анализа и синтеза радиосигналов и их обработка. Рязань: РРТИ, 1977, вып. 2.
12. Ванюшин В. И. К вопросу статистического описания импульсов потока на входе измерительной системы ЛДИС.— В кн.: Радиоэлектронные устройства. Рязань: РРТИ, 1976, вып. 1.
13. Постоенко Ю. К., Уткин Е. Н. Вопросы точности при аппаратурной обработке доплеровского сигнала.— Автометрия, 1976, № 3.
14. Ванюшин В. И., Моргунов А. Н., Нагорная Н. И. Устройство для обработки сигналов доплеровского измерителя скорости. (Автор. свид-во № 697940).— БИ, 1979, № 42.

Поступила в редакцию 12 октября 1977 г.;  
окончательный вариант — 6 мая 1983 г.