

УДК 621.37:621.391.161:535.361

В.С. Соболев, Ф.А. Журавель, Г.А. Кашеева,

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук (ИАиЭ СО РАН), Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. ак. Коптюга, 1, E-mail: sobolev@iae.nsk.su

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ СГЛАЖИВАНИЯ ВЫБРОСОВ ЧАСТОТЫ СИГНАЛОВ ЛАЗЕРНОГО ДОПЛЕРОВСКОГО АНЕМОМЕТРА

АННОТАЦИЯ

Предложен и исследован новый способ сглаживания выбросов частоты многочастичного сигнала лазерных доплеровских систем, основанный на ограничении получаемых ее значений заданным порогом. Показано, что в отсутствие шума выигрыш по точности может достигать 1,7 раза, а в присутствии шума до 3-х раз.

ЛАЗЕРНАЯ ДОПЛЕРОВСКАЯ АНЕМОМЕТРИЯ, ВЕТРОВЫЕ ЛИДАРЫ, ОПТИМАЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ ДОПЛЕРОВСКОЙ ЧАСТОТЫ

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что мгновенная частота доплеровского сигнала, несущая информацию о скорости исследуемого потока, может сильно флуктуировать, если анемометр, погодный радар или лидар работают в многочастичном режиме рассеяния [1-4]. Выбросы получаемых оценок частоты в точках с нулевыми значениями огибающей сигнала стремятся в бесконечность, что существенно повышает погрешности в оценках скорости даже при исследовании ламинарных безградиентных потоков. Те же явления возникают и при использовании критерия максимального правдоподобия [5]. В докладе рассмотрены новые пути снижения этих погрешностей и выполнены оценки их качества.

ОСОБЕННОСТИ ДИСКРЕТНОЙ ОБРАБОТКИ МНОГОЧАСТИЧНОГО ДОПЛЕРОВСКОГО СИГНАЛА

При работе анемометра в многочастичном режиме доплеровский сигнал образуется как сумма сигналов от каждой рассеивающей частицы. В качестве примера на рис. 1 представлен график вещественной части высокочастотной компоненты доплеровского сигнала как функции времени.

Отметим важную особенность этого сигнала: в тех точках оси времени, где его амплитуда приближается к нулю, мгновенная частота стремится к бесконечным значениям. Соответственно, дисперсия мгновенной частоты также бесконечно велика. Это означает, что даже при исследовании безградиентного ламинарного потока с постоянной скоростью, ошибки в ее оценке могут принимать очень большие значения.

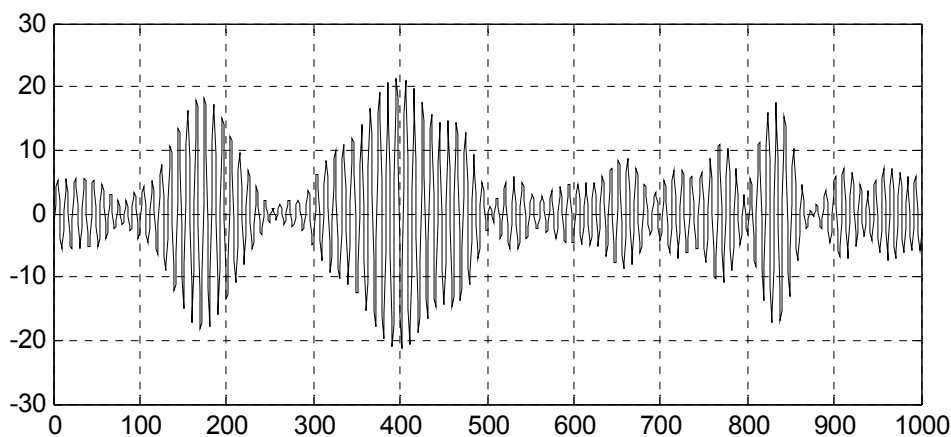


Рис. 1. График высокочастотной компоненты доплеровского сигнала как функция времени

Поскольку далее в докладе рассматривается цифровая обработка доплеровского сигнала, важно отметить, что в этом случае значения мгновенной частоты остаются конечными. Эту особенность можно трактовать следующим образом: в точках на оси времени, где амплитуда доплеровского сигнала падает до нуля, половина рассеивающих частиц дает сигнал в одной фазе, а вторая половина – в противоположной. Соответственно, фаза суммарного сигнала в этих точках совершает скачок на $+$ или $-\pi$. С учетом этого максимальное абсолютное значение круговой частоты, определенное как отношение приращений фазы к соответствующему приращению времени, составит величину $\omega_{\max} = \pi/T$, где T период дискретизации сигнала, а максимальное значение циклической частоты при этом будет равно

$$F_{\max} = \omega_{\max}/2\pi = 1/2T. \quad (1)$$

Если, например, $T = 1$ мкс, то независимо от истинного значения доплеровской частоты (скорости) в точке минимального значения амплитуды сигнала значение оцениваемой частоты составит 0,5 МГц. Соответственно, дисперсия частоты будет уже конечной, а не бесконечной величиной, хотя и достаточно большой.

Предлагаемая методика сглаживания оценок доплеровской частоты

Методика сглаживания состоит в том, что в алгоритм оценки частоты добавляется дополнительная операция, состоящая в том, что каждая оценка частоты сравнивается с устанавливаемым предварительно порогом, равным $F_{\text{ср}} \pm$ некоторая доля от максимальной величины выброса, определяемого формулой (1), например, $0,1F_{\max}$.

Примечания:

1. Предложенная методика даст полезный эффект в тех случаях, когда исследуются стационарные потоки со слабой турбулентностью и целью эксперимента является оценка ее интенсивности.
2. Предполагается также, что период дискретизации сигнала выбирается вблизи требований теоремы Котельникова, т.е. 3-5 отсчетов на период.

Если значение частоты выходит за границы верхнего или нижнего порога, то в качестве ее оценки выбирается значение соответствующего порога.

КОМПЬЮТЕРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ И ЕГО РЕЗУЛЬТАТЫ

Для оценки качества предложенного способа и определения получаемого выигрыша в точности был проведен компьютерный эксперимент и получены результаты сравнения среднеквадратичных отклонений (СКО) частоты с применением и без применения этой

методики. Кроме этого, в эксперимент были включены также исследования выигрыша в точности от применения стандартного алгоритма медианного сглаживания с использованием 3-х и 5 отсчетов сигнала. Методика эксперимента состояла из следующих этапов:

1. Формирование модели сигнала с заданными параметрами и заданным отношением сигнал/шум с использованием алгоритма, предложенного в [6].
2. Выполнение операций получения максимально правдоподобных оценок (МПО) доплеровской частоты в соответствии с алгоритмом, предложенным в [5].
3. Вычисление среднеквадратичных отклонений полученной реализации частоты. Оценка получаемого выигрыша в точности.

Ниже в виде Таблиц приводятся значения СКО МПО доплеровской частоты (погрешностей измерений) при осуществлении сглаживания с использованием 2-х, 3-х и 5-ти отсчетов сигнала для реализаций со следующими параметрами:

- средняя частота сигнала $F_d = 1$ Гц (период доплеровского сигнала $T_d = 1$ с),
- период дискретизации сигнала $dt = 0,1T_d = 0.1$ с,
- общая длина реализации смоделированного сигнала $T = 1000$ с,
- пороговое значение выброса частоты $F_{max} = \pm 5$ Гц.
- Задаваемое значение порога равно $F_{cp} \pm 0.1 F_{max}$
- Задаваемые времена корреляции сигнала: $T_k = 3$ с, 5 с и 10 с

Таблица 1. Зависимость СКО мгновенной частоты от числа отсчетов (m) без порога и с порогом, равным $F_{cp} \pm 0.1 F_{max}$, а также при медианном сглаживании, при различных отношениях сигнал/шум (S/N) для $T_k = 3$ с

S/N, дБ(Р)		m=2	m=3	m=4	m=5
б/ш	Без порога	0.1659	0.0628	0.0316	0.0221
	Порог ± 0.5	0.0981	0.0570	0.0312	0.0221
	Медиана n=3	0.1213	0.0541	0.0312	0.0221
	Медиана n=5	0.1214	0.0532	0.0312	0.0220
	Выигрыш 1	1.6911	1.1018	1.0128	1.0000
	Выигрыш 2	1.3677	1.1608	1.0128	1.0000
	Выигрыш 3	1.3666	1.1805	1.0128	1.0045
20	Без порога	0.3337	0.2548	0.2153	0.1805
	Порог ± 0.5	0.1792	0.1447	0.1236	0.1138
	Медиана n=3	0.2079	0.1865	0.1743	0.1547
	Медиана n=5	0.2173	0.1413	0.1303	0.1110
	Выигрыш 1	1.8622	1.7609	1.7419	1.5861
	Выигрыш 2	1.6051	1.3662	1.2352	1.1668
	Выигрыш 3	1.5357	1.8033	1.6523	1.6261
10	Без порога	0.8536	0.6674	0.5683	0.5153
	Порог ± 0.5	0.2674	0.2368	0.1988	0.1765
	Медиана n=3	0.4733	0.5211	0.4995	0.4609
	Медиана n=5	0.5333	0.3501	0.3501	0.3385
	Выигрыш 1	3.1922	2.8184	2.8587	2.9195
	Выигрыш 2	1.8035	1.2808	1.1377	1.1180
	Выигрыш 3	1.6006	1.9063	1.6233	1.5223

Выигрыш 1: без порога / с порогом; Выигрыш 2: без порога / медиана = 3;
 Выигрыш 3: без порога / медиана = 5

Таблица 2. Зависимость СКО мгновенной частоты от числа отсчетов (m) без порога и с порогом, равным $F_{cp} \pm 0.1 F_{max}$, а также при медианном сглаживании, при различных отношениях сигнал/шум (S/N) для $T_k = 5$ с

S/N, дБ(Р)		m=2	m=3	m=4	m=5
б/ш	Без порога	0.1161	0.0400	0.0184	0.0115
	Порог ± 0.5	0.0693	0.0372	0.0184	0.0115
	Медиана n=3	0.0860	0.0354	0.0184	0.0115
	Медиана n=5	0.0809	0.0359	0.0180	0.0116
	Выигрыш 1	1.6753	1.0753	1.0000	1.0000
	Выигрыш 2	1.3500	1.1299	1.0000	1.0000
	Выигрыш 3	1.4351	1.1142	1.0222	0.9914
20	Без порога	0.3706	0.2648	0.2316	0.2026
	Порог ± 0.5	0.1771	0.1407	0.1102	0.0978
	Медиана n=3	0.1964	0.2187	0.2059	0.1801
	Медиана n=5	0.2385	0.1753	0.1710	0.1327
	Выигрыш 1	2.0926	1.8820	2.1016	2.0716
	Выигрыш 2	1.8870	1.2108	1.1248	1.1249
	Выигрыш 3	1.5539	1.5106	1.3544	1.5268
10	Без порога	0.9344	0.7460	0.6541	0.6029
	Порог ± 0.5	0.2595	0.2348	0.1979	0.1756
	Медиана n=3	0.5088	0.5959	0.5733	0.5541
	Медиана n=5	0.6050	0.4345	0.4165	0.4002
	Выигрыш 1	3.6008	3.1772	3.3052	3.4334
	Выигрыш 2	1.8365	1.2519	1.1409	1.0881
	Выигрыш 3	1.5445	1.7169	1.5705	1.5065

Выигрыш 1: без порога / с порогом; Выигрыш 2: без порога / медиана = 3;
Выигрыш 3: без порога / медиана = 5.

Таблица 3. Зависимость СКО мгновенной частоты от числа отсчетов (m) без порога и с порогом, равным $F_{cp} \pm 0.1 F_{max}$, а также при медианном сглаживании, при различных отношениях сигнал/шум (S/N) для $T_k = 10$ с

S/N, дБ(Р)		m=2	m=3	m=4	m=5
б/ш	Без порога	0.0531	0.0208	0.0094	0.0073
	Порог ± 0.5	0.0440	0.0208	0.0094	0.0073
	Медиана n=3	0.0508	0.0191	0.0094	0.0072
	Медиана n=5	0.0451	0.0189	0.0096	0.0072
	Выигрыш 1	1.2068	1.0000	1.0000	1.0000
	Выигрыш 2	1.0453	1.0890	1.0000	1.0139
	Выигрыш 3	1.1774	1.1005	0.9792	1.0139
20	Без порога	0.3896	0.3173	0.2610	0.2411
	Порог ± 0.5	0.1801	0.1347	0.1043	0.0912
	Медиана n=3	0.2334	0.2487	0.2281	0.2136
	Медиана n=5	0.2365	0.1556	0.1372	0.1442
	Выигрыш 1	2.1632	2.3556	2.5024	2.6436
	Выигрыш 2	1.6692	1.2758	1.1442	1.1287
	Выигрыш 3	1.6474	2.0392	1.9023	1.6720
10	Без порога	0.9500	0.7564	0.6769	0.6380
	Порог ± 0.5	0.2600	0.2388	0.2016	0.1778
	Медиана n=3	0.5186	0.6309	0.5974	0.5871
	Медиана n=5	0.6043	0.4765	0.4289	0.4621
	Выигрыш 1	3.6538	3.1675	3.3576	3.5883
	Выигрыш 2	1.8319	1.1989	1.1331	1.0867
	Выигрыш 3	1.5721	1.5874	1.5782	1.3807

Выигрыш 1: без порога / с порогом; Выигрыш 2: без порога / медиана = 3;
Выигрыш 3: без порога / медиана = 5.

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

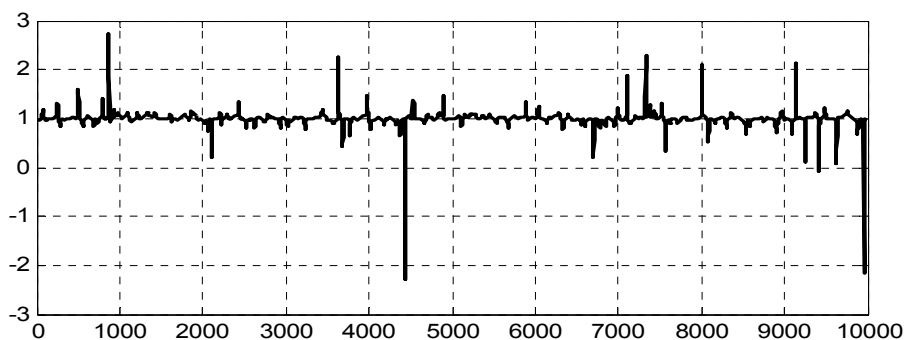
Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. В отсутствии шума наибольший выигрыш от применения предложенного порогового метода сглаживания оценок частоты достигается при использовании 2-х отсчетов сигнала с широким спектром (время корреляции $3 T_d$). Значение выигрыша составляет 1,7. Для сигналов с более узким спектром (время корреляции $5 T_d$ и $10 T_d$) выигрыш падает и составляет величины 1,6 и 1,2. С увеличением числа отсчетов выигрыш практически отсутствует.

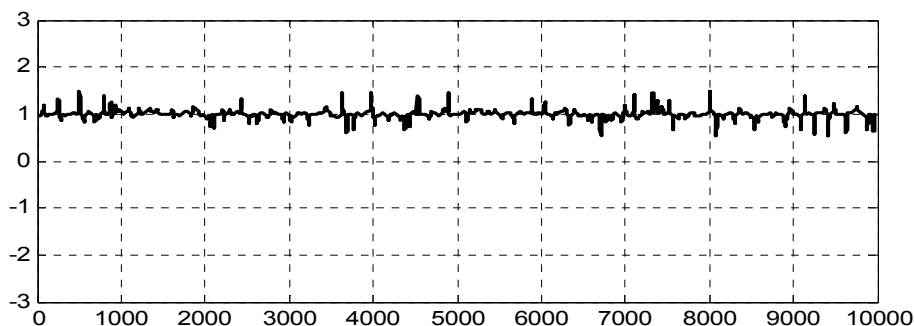
2. В присутствии шума выигрыш возрастает. Так, при отношениях с/ш = 20 дБ и 10 дБ для сигнала с временем корреляции $3 T_d$ он составляет, соответственно, 1,8 и 3,2 раза.

3. Что касается сглаживания медианным способом, то выигрыш от его применения менее значим, чем пороговый.

На рис. 2 в качестве примера представлены: (а) несглаженная реализация максимально правдоподобных оценок частоты сигнала с временем корреляции $5 T_d$, полученная по двум отсчетам сигнала; и (б) – сглаженная пороговым способом реализация частоты с порогом $0.1 F_{max}$. Из рисунка хорошо видно существенное уменьшение амплитуды выбросов частоты.



(а)



(б)

Рис. 2. Влияние сглаживания МПО частоты сигнала пороговым способом.

а) Мгновенная частота, полученная по 2-м отсчетам

б) Мгновенная частота, фильтрованная с порогом $0.1 F_{max}$

В качестве примера на рис. 3 представлены графики СКО МПО доплеровской частоты как функции числа используемых отсчетов и отношения сигнал/шум, а на рис. 4 получаемый выигрыш в точности (в разгах), достигаемый в результате сглаживания.

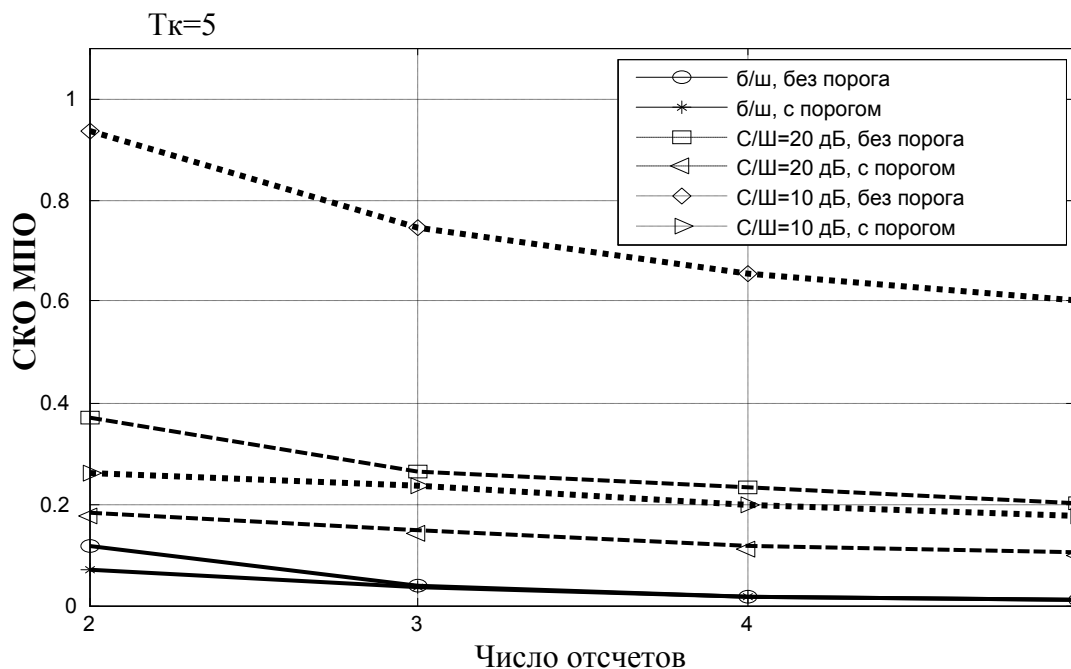


Рис. 3. График значений СКО МПО доплеровской частоты как функции числа используемых отсчетов и отношения сигнал/шум при разных способах фильтрации (сглаживания)

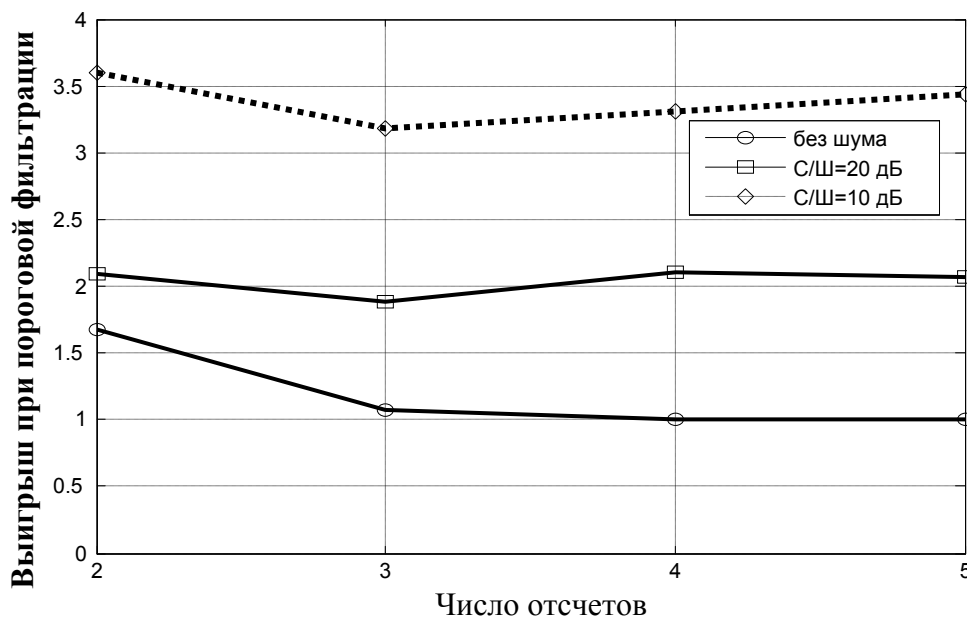


Рис. 4. Выигрыш в точности оценок (в раз) в зависимости от числа используемых отсчетов и отношения сигнал/шум при пороговой фильтрации

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод сглаживания выбросов частоты сигналов лазерных доплеровских систем позволит существенно уменьшить погрешности максимально правдоподобных оценок этой частоты (скорости).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лазерные доплеровские измерители скорости** / Ю.Н. Дубнищев, В.П. Коронкевич, В.С. Соболев и др., Под ред. Ю.Е. Нестерихина. Новосибирск: Наука, 1975. 164 с.
2. **Коронкевич В.П., Соболев В.С., Дубнищев Ю.Н.** Лазерная интерферометрия. Новосибирск: Наука, 1983. 214 с.
3. **Doviak R.J., Zrnich D.S.** Doppler Radar and Weather Observations, 2-nd ed., Dover Publications Inc., 2006. 562 p.
4. **Frelich. R. G.** Kramer-Rao Bound for Gaussian Random Processes and Applications to Radar Processing of Atmospheric Signals // IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing, 1993.V. 31. № 6. P. 1123.
5. **Соболев В.С., Журавель Ф.А.** Максимально правдоподобные оценки частоты сигналов лазерных доплеровских анемометров // Радиотехника и электроника. 2014. Т. 59. № 4. С. 322-330.
6. **Sirmans D., Bumgarner B.** Numerical Comparison of Five Mean Frequency Estimators // J. Appl. Meteor, 1975. V. 14. P. 991-1003.

V.S. Sobolev, F.A. Zhuravel, G.A. Kashcheeva

Institute of Automation and Electrometry Russian Academy of Sciences, Siberian Branch, Russia, 630090, Novosibirsk, Acad. Koptyug Ave., 1, E-mail: sobolev@iae.nsk.su

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE SMOOTHING ALGORITHMS OF FREQUENCY OVERSHOOTS IN LASER DOPPLER ANEMOMETRY

The new way of the multiparticle Doppler signal frequency overshoots smoothing based on restriction of the received frequency values with the set threshold is offered and investigated. It is shown that in the absence of noise the gain in accuracy can reach 1,7 times, and in the presence of noise to 3 times.

LASER DOPPLER ANEMOMETRY, WIND LIDAR, DOPPLER FREQUENCY OPTIMAL ESTIMATES