

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА ПОДАВЛЕНИЯ ПОМЕХИ В КАНАЛЕ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА БАЗЕ ШЕСТИПЛЕЧЕГО МОСТА*

А.В. Клименко, К.А. Кузьмин

Институт природно-технических систем,
РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: chirpyu@mail.ru

В ходе исследования измерительного канала температуры гидрологохимического модуля морской прибрежной станции БРИЗ-1 был выявлен эффект уменьшения на несколько порядков случайной составляющей погрешности измерения. Эффект возникал при вычислении средней арифметической величины значений температур двух резистивных датчиков, являющихся плечами шестиплеечевого моста. Дано объяснение этого эффекта с помощью анализа фрагмента записи экспериментальных данных. Дана теоретическая количественная оценка эффекта подавления помехи. Показано, что аддитивная шумовая составляющая двух датчиков в данном эксперименте снижается в 5840 раз, порядок полученной величины согласуется с теоретической количественной оценкой.

Ключевые слова: измерение температуры, шестиплеечий мост, подавление помехи.

Поступила в редакцию: 07.10.2019.

Введение. Повышенные требования к точности температурных измерений с целью уменьшения динамической погрешности измерения, обусловленной тепловой инерцией датчика, диктуют необходимость применять для этой цели

два датчика с разной инерционностью [1].

Материалы и методы. На рис. 1 представлена измерительная схема канала температуры на основе шестиплеечевого моста [2].

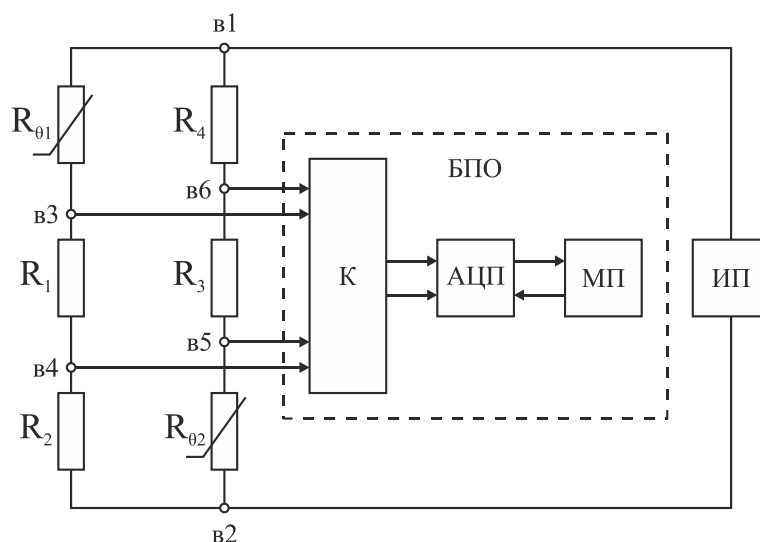


Рис. 1. Электрическая схема канала температуры на основе шестиплеечевого моста
Fig. 1. The electrical circuit of temperature channel based on a six-armed bridge

БПО – блок преобразования и обработки на базе ADS1216, К – коммутатор, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, МП – микропроцессор, ИП – источник питания, R_{01} , R_{02} – датчики тем-

пературы, сопротивление которых меняется в пределах 1000–1200 Ом, R_1 , R_2 , R_3 , R_4 – образцовые резисторы,

* Публикуется в дискуссионном порядке.

$R_1 = R_3 = 200 \text{ Ом}$, $R_2 = R_4 = 1000 \text{ Ом}$, в1, в2 – вершины измерительного моста по питанию, в3, в4, в5, в6 – вершины измерительного моста, являющиеся входами БПО.

U_1, U_2, U_3, U_4 – напряжения, измеряемые между вершинами в6 и в3, в5 и в4, в3 и в4, в6 и в5 соответственно. Сопротивления двух термодатчиков R_{θ_1} и R_{θ_2} вычисляются по формулам:

$$R_{\theta_1} = \frac{R_1 R_4 U_4}{R_3 U_3} + R_1 \frac{U_1}{U_3}, \quad (1)$$

$$R_{\theta_2} = \frac{R_2 R_3 U_3}{R_1 U_4} + R_3 \frac{U_2}{U_4}. \quad (2)$$

В процессе испытаний гидрологохимического модуля морской прибрежной станции БРИЗ-1 [3], в состав которого входит измерительный канал температуры, реализованный в соответствии с описанной схемой, изучались графики температуры морской воды, и было замечено, что шумовая составляющая температуры, вычисленной по формуле (1), находится в противофазе к шумовой составляющей температуры, вычисленной по формуле (2). Исследованию этого факта и его использованию при измерении одной температуры двумя идентичными датчиками посвящается эта работа.

Обращаем внимание на то, что отношение U_4/U_3 и обратное ему U_3/U_4

входят в первое слагаемое обеих формул. Для преобразования полученных значений сопротивлений в температуру по результатам градуировки для каждого термодатчика находился расчётный полином четвёртой степени преобразования сопротивления в температуру. Метод уменьшения шумовой составляющей результатов измерения температуры, который описывается в данной статье, предполагает существенное снижение случайной погрешности вследствие вычисления среднего арифметического термосопротивлений по сравнению с результатом измерения термосопротивления одиночного датчика. Для анализа этого метода рассмотрим фрагмент записи измерительного канала температуры, приведённый в табл. 1, включающей следующие исходные данные: время, напряжения U_1, U_2, U_3 и U_4 и температуры T_1 и T_2 , вычисленные по формулам (1) и (2) и градуировочным полиномам, их среднее арифметическое. Также в табл. 1 содержатся другие, представляющие интерес для исследования, величины: отношения $U_1/U_3, U_2/U_4$ и их среднее арифметическое, отношение U_3/U_4 и среднее арифметическое отношений U_3/U_4 и U_4/U_3 .

Разброс значений температуры достигает $0,005 \text{ }^\circ\text{C}$ для каждого датчика, а их шумовая составляющая примерно равна $2 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}$. Графики температур T_1, T_2 и их среднего значения представлены на рис. 2.

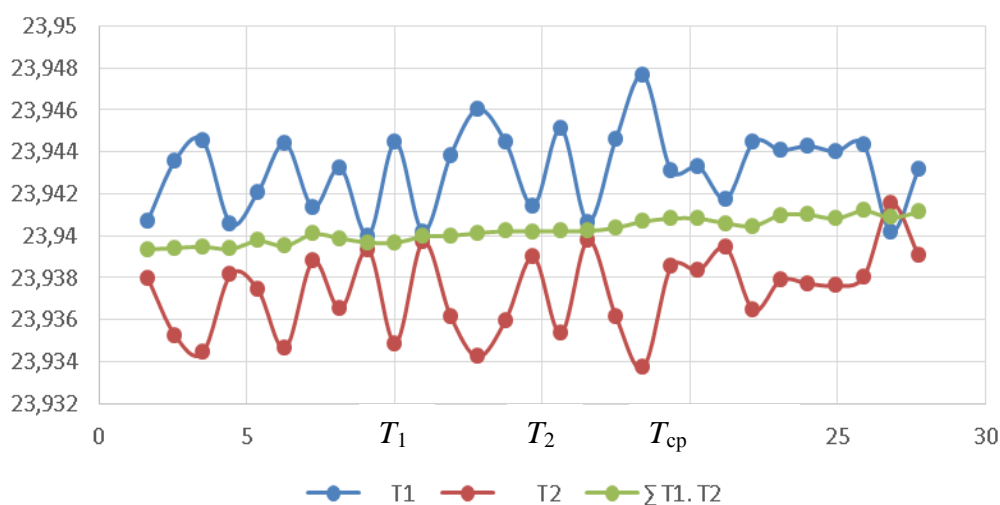


Рис. 2. Графики температур T_1, T_2 и их среднего значения
Fig. 2. Temperature plots T_1, T_2 and their average value

Таблица 1. Фрагмент записи измерительного канала температуры

$t, \text{с}$	$T_1, \text{°C}$	$T_2, \text{°C}$	$T_{\text{сп}}, \text{°C}$	$U_1, \text{мВ}$	$U_2, \text{мВ}$	$U_3, \text{мВ}$	$U_4, \text{мВ}$	U_1/U_3	U_2/U_4	$\left(\frac{U_1}{U_3} + \frac{U_2}{U_4}\right)/2$	U_3/U_4	$\left(\frac{U_2}{U_3} + \frac{U_4}{U_3}\right)/2$
1,7	23,94071	23,93797	23,93934	46,90215	46,8885	102,5884	102,6065	0,457188	0,456974	0,457080778	0,999824	1,000000016
2,6	23,94356	23,93525	23,93941	46,90215	46,88885	102,588	102,6072	0,457189	0,456974	0,457081776	0,999813	1,000000017
3,5	23,94453	23,93441	23,93947	46,90215	46,88903	102,5877	102,6072	0,457191	0,456976	0,457083404	0,99981	1,000000018
4,5	23,94058	23,93813	23,93936	46,90197	46,88903	102,5888	102,6068	0,457184	0,456978	0,457080963	0,999824	1,000000016
5,4	23,94207	23,93742	23,93975	46,90285	46,8892	102,588	102,6065	0,457196	0,456981	0,457088472	0,99982	1,000000016
6,3	23,9444	23,93461	23,93951	46,90179	46,88939	102,5877	102,6072	0,457187	0,45698	0,457083404	0,99981	1,000000018
7,2	23,94136	23,93878	23,94007	46,90321	46,88992	102,588	102,6061	0,4572	0,456989	0,457094467	0,999824	1,000000016
8,2	23,94323	23,93651	23,93987	46,90321	46,88939	102,588	102,6068	0,4572	0,456981	0,457090323	0,999817	1,000000017
9,1	23,94	23,93933	23,93967	46,90268	46,88939	102,5888	102,6065	0,457191	0,456983	0,45708692	0,999827	1,000000015
10	23,94446	23,93486	23,93966	46,90179	46,88973	102,5873	102,6068	0,457189	0,456984	0,457086659	0,99981	1,000000018
11	23,94019	23,93971	23,93995	46,90285	46,88992	102,5884	102,6061	0,457194	0,456989	0,457091915	0,999827	1,000000015
11,9	23,94382	23,93616	23,93999	46,90251	46,89045	102,5877	102,6068	0,457194	0,456991	0,45709284	0,999813	1,000000017
12,8	23,94602	23,93422	23,94012	46,90304	46,89045	102,5873	102,6072	0,457201	0,45699	0,45709543	0,999807	1,000000019
13,8	23,94446	23,93596	23,94021	46,90357	46,88992	102,5873	102,6065	0,457206	0,456988	0,457096985	0,999813	1,000000017
14,7	23,94142	23,93897	23,9402	46,90339	46,89027	102,588	102,6061	0,457201	0,456993	0,457097057	0,999824	1,000000016
15,6	23,94511	23,93532	23,94022	46,90321	46,8908	102,5877	102,6072	0,457201	0,456993	0,457097204	0,99981	1,000000018
16,6	23,94065	23,93978	23,94022	46,90392	46,89027	102,5888	102,6065	0,457203	0,456991	0,457097241	0,999827	1,000000015
17,5	23,94459	23,93616	23,94038	46,9041	46,89062	102,588	102,6072	0,457208	0,456992	0,457099906	0,999813	1,000000017
18,4	23,94764	23,9337	23,94067	46,90463	46,89151	102,5877	102,6079	0,457215	0,456997	0,457106013	0,999803	1,000000019
19,4	23,94311	23,93852	23,94082	46,90481	46,89134	102,588	102,6065	0,457215	0,457002	0,457108379	0,99982	1,000000016
20,3	23,9433	23,93832	23,94081	46,90516	46,89098	102,588	102,6065	0,457219	0,456998	0,45710838	0,99982	1,000000016
21,2	23,94175	23,93942	23,94059	46,90427	46,89151	102,5888	102,6068	0,457207	0,457002	0,457104272	0,999824	1,000000016
22,2	23,94446	23,93645	23,94046	46,90392	46,89115	102,588	102,6072	0,457206	0,456997	0,457101606	0,999813	1,000000017
23,1	23,94408	23,93787	23,94098	46,90446	46,89151	102,587	102,6058	0,457216	0,457007	0,457111452	0,999817	1,000000017
24	23,94427	23,93771	23,94099	46,90516	46,89151	102,5877	102,6065	0,45722	0,457003	0,457111747	0,999817	1,000000017
25	23,94401	23,93761	23,94081	46,90463	46,89134	102,5877	102,6065	0,457215	0,457002	0,457108307	0,999817	1,000000017
25,9	23,94433	23,93803	23,94118	46,90499	46,89186	102,587	102,6058	0,457222	0,45701	0,457115743	0,999817	1,000000017
26,8	23,94019	23,94152	23,94086	46,90463	46,89151	102,5884	102,6058	0,457212	0,457007	0,457109156	0,999831	1,000000014
27,7	23,94317	23,93907	23,94112	46,90516	46,89257	102,5884	102,6068	0,457217	0,457012	0,457114558	0,99982	1,000000016

Характер изменения температур T_1 и T_2 имеет явно выраженный противофазный вид из-за наличия в первом слагаемом уравнения (1) отношения U_4/U_3 и обратного ему U_3/U_4 в уравнении (2). Если взять среднее арифметическое от обеих температур, то получим кривую T_{cp} , шумовая составляющая которой значительно меньше шумовой составляющей кривых T_1 и T_2 . Этот эффект опирается на свойство суммы положительных взаимобратных чисел, $\frac{a}{b} + \frac{b}{a} \geq 2$, которое при стремлении a к b стремится к 2, т. е. константе, существенно уменьшая при этом шумовую составляющую. Основной вклад в шумовую составляющую уравнений (1) и (2) вносит первое

слагаемое этих уравнений по двум причинам: во-первых, в формуле (1) отношение коэффициентов при первом отношении (R_1R_4/R_3) и при втором отношении (R_1) численно равно 5, из-за чего вклад первого слагаемого в шумовую составляющую в 5 раз больше, чем вклад второго слагаемого, аналогично для формулы (2); во-вторых, диапазон изменения U_1 и U_2 примерно равен 130 мВ, а U_3 и U_4 – 10 мВ на весь диапазон изменения температуры 0–35 °С применяемого платинового датчика температуры Pt1000.

Пусть $R_1R_4/R_3=R_2R_3/R_1=A$, $R_1=R_3=B$, тогда среднее арифметическое величин T_1 и T_2 вычисляется в соответствии с выражением

$$T_{cp} = \frac{T_1 + T_2}{2} = \frac{A}{2} \left(\frac{U_4}{U_3} + \frac{U_3}{U_4} \right) + \frac{B}{2} \left(\frac{U_1}{U_3} + \frac{U_2}{U_4} \right). \quad (3)$$

На рис. 3 представлена кривая среднеарифметической температуры. Это та же кривая, что и на рис. 2, но в увели-

ченном масштабе. Основной вклад в ее формировании принимает участие второе слагаемое уравнений (1) и (2).

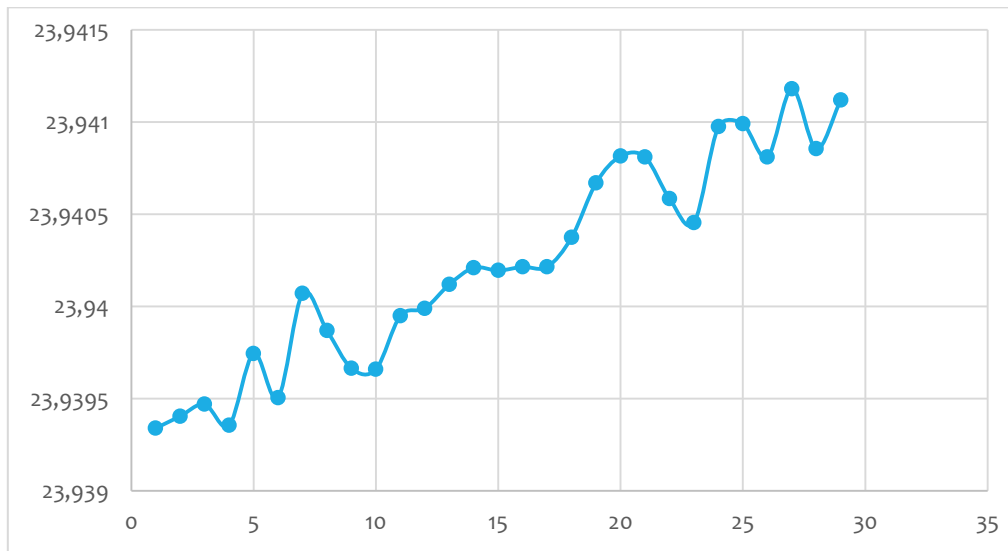


Рис. 3. Кривая среднеарифметической температуры T_{cp}
Fig. 3. Arithmetic mean temperature curve T_{av}

Среднее арифметическое $\left(\frac{U_1}{U_3} + \frac{U_2}{U_4}\right)/2$ показано на рис. 4. Как мы видим, качественный характер изменения температуры на рис. 3 и среднеарифметической величины на рис. 4 идентичен, из чего

можно сделать вывод, что основной вклад в шумовую составляющую T_{cp} вносит второе слагаемое уравнений (1) и (2), в то время как влияние первого слагаемого в выражении (3) в значительной мере ослаблено.

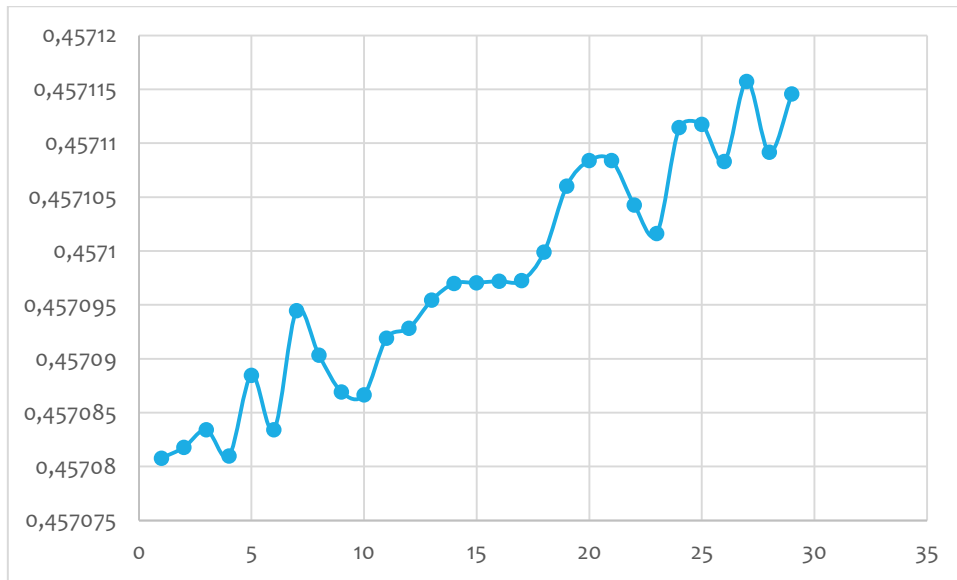


Рис. 4. Кривая среднеарифметической температуры $(\frac{U_1}{U_3} + \frac{U_2}{U_4})/2$

Fig. 4. Arithmetic average temperature curve $(\frac{U_1}{U_3} + \frac{U_2}{U_4})/2$

Результаты и обсуждение. Оценим степень подавления шума от применения метода. Для этого из табл. 1 необходимо взять отношение среднеквадратических отклонений значений колонок U_3/U_4 и $(\frac{U_3}{U_4} + \frac{U_4}{U_3})/2$. Эта величина составляет $6,85 \cdot 10^{-6}/1,25 \cdot 10^{-9} = 5480$. Таким образом, шумовая составляющая первого члена уравнений (1) и (2) в 5480 раз больше шумовой составляющей первого члена в уравнении (3), откуда можно сделать вывод, что шумы уравнения (3) с применением данного метода сводятся к шумам лишь за счет второго члена этого уравнения.

Дадим количественную оценку полученных результатов. Рассмотрим работу измерителя температуры в установленном режиме: температура среды постоянна, значит, сопротивления датчиков температуры равны, $R_{01} = R_{02}$. Так как сопротивления резисторов моста подобраны таким образом, что $R_1 = R_3$, $R_2 = R_4$, то напряжения на резисторах R_3 и R_4 равны, $U_3 = U_4 = U_{34}$. АЦП измеряет напряжения U_3 и U_4 с некоторыми погрешностями d_3 и d_4 соответственно, выдавая цифровые коды $N_3 = N_{34} + d_3$ и $N_4 = N_{34} + d_4$.

$$\frac{N_3}{N_4} = \frac{N_{34} + d_3}{N_{34} + d_4} = 1 + \frac{d_3 - d_4}{N_{34} + d_4}, \quad (4)$$

$$\frac{N_4}{N_3} = \frac{N_{34} + d_4}{N_{34} + d_3} = 1 + \frac{d_4 - d_3}{N_{34} + d_3}, \quad (5)$$

$$\frac{1}{2} \left(\frac{N_3}{N_4} + \frac{N_4}{N_3} \right) = 1 + \frac{(d_3 - d_4)^2}{2(N_{34} + d_3)(N_{34} + d_4)}. \quad (6)$$

Таким образом, видно, что шумовая составляющая выражений (4) и (5) прямо пропорционально разности аддитивных погрешностей и обратно пропорци-

ональна величине N_{34} , тогда как в случае вычисления их среднего арифметического (6) шумовая составляющая прямо пропорциональна квадрату разности по-

грешности и обратно пропорциональна квадрату величины N_{34} . Поскольку $d_3, d_4 \ll N_{34}$, то шумовая составляющая во втором случае значительно уменьшается.

Пусть величины d_3 и d_4 изменяются в пределах $[-d; d]$. Проанализировав область значений шумовой составляющей, получим, что в первом случае значения шума будут лежать в интервале $[-2d/N_{34}; 2d/N_{34}]$, а во втором случае – в интервале $[0; 2(d/N_{34})^2]$, т. е. при соотношении $d/N_{34} \sim 0,0001$ получается, что в первом случае значения шума находятся в диапазоне $\pm 2 \cdot 10^{-4}$, тогда как во втором случае не превышают $2 \cdot 10^{-8}$.

В формулах (1), (2) при отношениях U_3/U_4 и U_4/U_3 стоит коэффициент, численно равный 1000. Это означает, что вклад погрешности вычисления этих слагаемых в определение величины термосопротивления составляет до 0,2 Ом по абсолютной величине или приблизительно $0,05^\circ\text{C}$ при расчёте температуры, тогда как при вычислении среднего арифметического соответствующие величины не превысят $2 \cdot 10^{-5}$ Ом и $5 \cdot 10^{-6}^\circ\text{C}$.

Заключение. В работе исследован метод уменьшения шумовой составля-

ющей измерения температуры за счёт вычисления среднего арифметического значения температур двух датчиков температуры, подключённых во вторичный измерительный преобразователь на базе шестиплевого моста [1], приводящий к снижению аддитивной шумовой составляющей сопротивлений этих датчиков в 5480 раз. Результат не зависит от последовательности измерения напряжений шестиплевого моста.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гайский В.А., П.В. Гайский.* Перспективные технологии температурных измерений в море. Ч. 1: Использование точечных датчиков. Севастополь. 2017. 181 с.
2. *Гайский В.А., Гайский П.В., Логвинчук А.Н., Клименко А.В.* Цифровой измеритель температуры // Патент России № 2549255. 2015. Бюл. № 11.
3. *Морская прибрежная станция БРИЗ-1 / В.А. Гайский, Н.А. Греков, П.В. Гайский [и др.]* // Системы контроля окружающей среды. Севастополь: МГИ НАНУ. 2006. С. 9–23.

STUDY OF THE EFFECT OF NOISE REDUCTION IN THE TEMPERATURE MEASURING CHANNEL BASED ON FOUR-ARMED BRIDGE

A.V. Klimenko, K.A. Kuzmin

Institute of Natural and Technical Systems,
RF, Sevastopol, Lenin St., 28

During the study of the measuring channel of the temperature of the hydrological and chemical module of the BRIZ-1 offshore coastal station, the effect of reducing the random component of the measurement error by several orders of magnitude was revealed. The effect occurred when calculating the arithmetic mean of the temperature values of two resistive sensors, which are the arms of a six-armed bridge. An explanation of this effect is given by analyzing a fragment of the recording of experimental data. A theoretical quantitative assessment of the interference suppression effect is given. It is shown that the additive noise component of two sensors in this experiment decreases by a factor of 5840, the order of the obtained value is consistent with a theoretical quantitative estimate.

Keywords: temperature measurement, six-armed bridge, noise reduction.