

# 10, октябрь 2015

УДК 629.7.05

### **Математическая модель микромеханического баровысотомера**

*Ажгиревич И.Л., студент, техник 1-ой категории  
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана,  
кафедра «Приборы и системы ориентации, стабилизации, навигации»,  
Россия, 127018, г. Москва, АО «ЦНИИАГ»*

*Киряченко Г.Ю., студент, техник 1-ой категории  
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана,  
кафедра «Приборы и системы ориентации, стабилизации, навигации»,  
Россия, 127018, г. Москва, АО «ЦНИИАГ»*

*Научный руководитель: Кветкин Г.А., к.т.н, доцент, нач. лаборатории  
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
Россия, 127018, г. Москва, АО «ЦНИИАГ»  
[bauman@bmstu.ru](mailto:bauman@bmstu.ru)*

Барометрический высотомер предназначен для определения барометрической или относительной высоты. Прибор находит применение в авиации как пилотажно-навигационное устройство, служащее для определения высоты полёта относительно некоторой точки отсчёта, например, аэродрома для проведения относительных измерений, или уровня моря - для абсолютных измерений.

В статье рассматривается применение пьезо-резистивного микромеханического датчика Bosh BMP085, предназначенного для использования в мобильных устройствах, навигационных приборах и уличном оборудовании. Он способен измерять давление воздуха в диапазоне 300...1100 гПа, что соответствует изменению высоты от +9000 м до -500 м над уровнем моря при нормальных условиях. Также датчик позволяет проводить измерение температуры воздуха одновременно с измерениями давления. Технические характеристики прибора приведены в таблице.

Напряжение питания, В	1,8 — 3,6
Потребляемый ток, мкА	5 — для 1 образца/сек в стандартном режиме, 0,1 — в режиме ожидания
Уровень шума, гПа	0,06 (0,5 м) — 0,03 (0,25 м) в зависимости от режима

Датчик поставляется в компактном корпусе LCC8 (керамическом бесприпойном с 8 контактными площадками, 5x5x1,2 мм), что позволяет разработать малогабаритное устройство. Чтение результатов измерений, а также настройка прибора осуществляется по двухпроводному интерфейсу I<sup>2</sup>C на частотах до 3,4 МГц. Применение внешнего источника тактовых импульсов не требуется. Датчик проходит заводскую калибровку, и калибровочные коэффициенты хранятся в его памяти.

В работе прибор подключается к микроконтроллеру измерительного блока по шине I<sup>2</sup>C. В ВМР085 применены пьезо-резистивный датчик, аналого-цифровой преобразователь и устройство управления, содержащее энергонезависимую память EEPROM, а также интерфейс I<sup>2</sup>C. Передаваемые данные не скомпенсированы в исходном виде, и подлежат пересчёту в соответствии со считанными из памяти калибровочными коэффициентами, служащими для компенсации смещения нуля, температурного дрейфа и прочих параметров датчика.

Получение измерений температуры и давления происходит следующим образом. Микроконтроллер отправляет стартовую последовательность для пуска измерения температуры или давления. После пережидания периода измерения его результат (далее: UP — для давления, UT— для температуры) может быть считан через интерфейс I<sup>2</sup>C. Для пересчёта показаний в градусы Цельсия и гПа необходимо использовать калибровочную информацию, которая может быть аналогичным образом считана из памяти EEPROM через I<sup>2</sup>C при инициализации алгоритма.

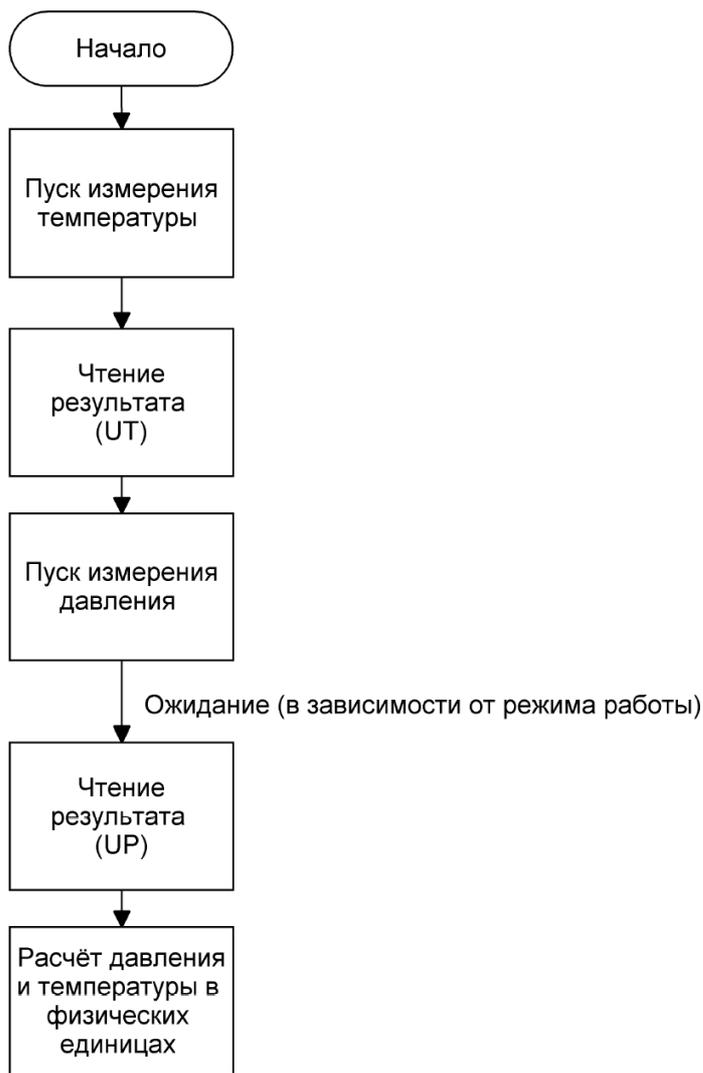


Рис. 1. Схема алгоритма опроса прибора

Частота измерений может быть достаточно высокой: вплоть до 128 измерений в секунду (в стандартном режиме) при необходимости динамических измерений. В этом случае будет достаточно измерять температуру только один раз в секунду и принимать её значение неизменным при измерении давления в течение этого же времени. Структурно алгоритм опроса представлен на рис. 1.

По измеренным значениям давления ( $p$ ) и температуры ( $T$ ), а также по значениям давления ( $p_0$ ) и температуры ( $T_0$ ) на уровне моря, высота в метрах над уровнем моря может быть определена из эмпирической барометрической зависимости вида (см. рис. 1):

$$H = 18400 \cdot \left(1 + b_a \frac{(T - T_0)}{2}\right) \cdot \lg \frac{p_0}{p}, \quad (1)$$

где  $b_a = 0.00366 \text{ [K}^{-1}\text{]}$  — коэффициент температурного расширения воздуха.

Соответственно, согласно (1) изменение давления на 1 гПа соответствует изменению высоты на 8,43 м на уровне моря.

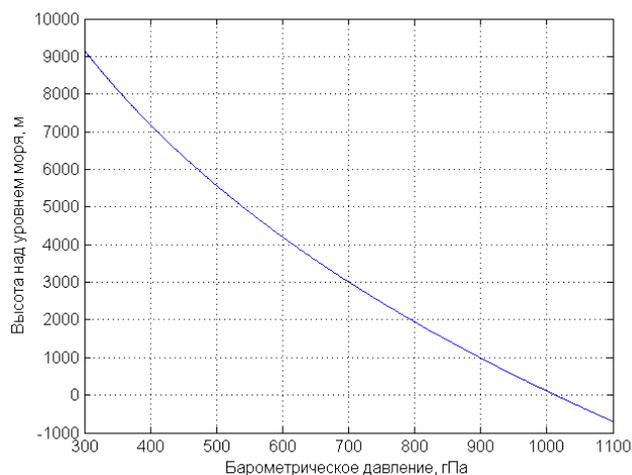
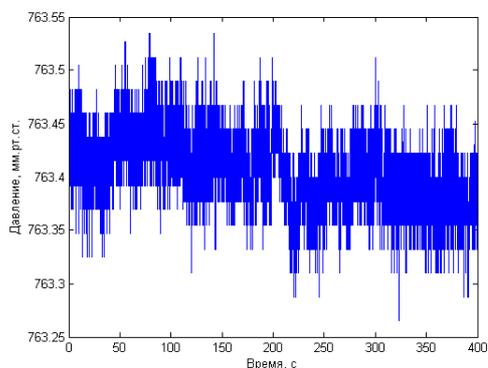


Рис.2. Зависимость атмосферного давления от  
 ВЫСОТЫ

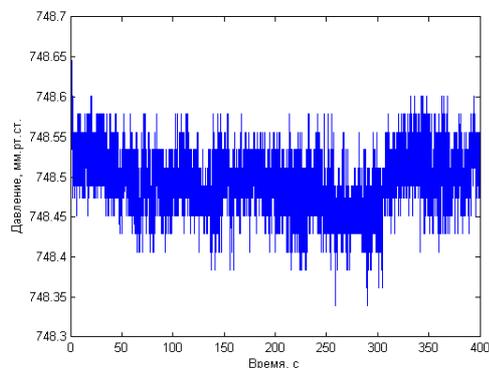
в диапазоне от 980 до 1090 гПа [4], что соответствует дрейфу высоты (рис. 2, ф-ла (1)) в 1176 м (при нормальных условиях).

Также в течение суток давление непостоянно и совершает случайные колебания с размахом около 2 гПа, что является причиной ошибки определения высоты приблизительно в 16 м.

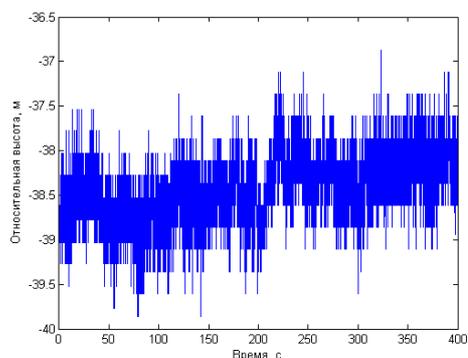
Таким образом, зная давление на уровне моря или аэродрома и измеряя его текущее значение на высоте полёта, можно по разности их значений получить разность высот между этими уровнями и вычислить соответственно абсолютную или относительную высоту. Однако, в зависимости от погодных условий давление на уровне моря меняется в течение года в соответствии с метеорологическими наблюдениями



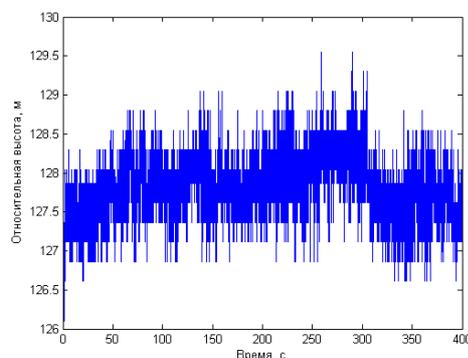
а) при ясной погоде



б) при пасмурной погоде



в) высота, рассчитанная по показаниям (а)



г) высота, рассчитанная по показаниям (б)

Рис. 3. Показания прибора при различных параметрах атмосферы

Как видно, для правильного расчёта высоты совершенно необходимо располагать значениями атмосферного давления на уровне моря или аэродрома. Эти данные предоставляются диспетчером наземных служб. На рис. 3. приведён пример показаний прибора, расположенного на одной и той же высоте (приблизительно 120 м), но в разные дни. Видно, что в силу колебаний давления на уровне земли (и, разумеется, моря) рассчитанные значения высоты сильно различаются (в примере на рис. 3 - приблизительно на 160 м).

Микромеханическое исполнение датчика является причиной существенной зашумлённости измерений. Пример «сырого» вывода датчика показан на рис. 3.

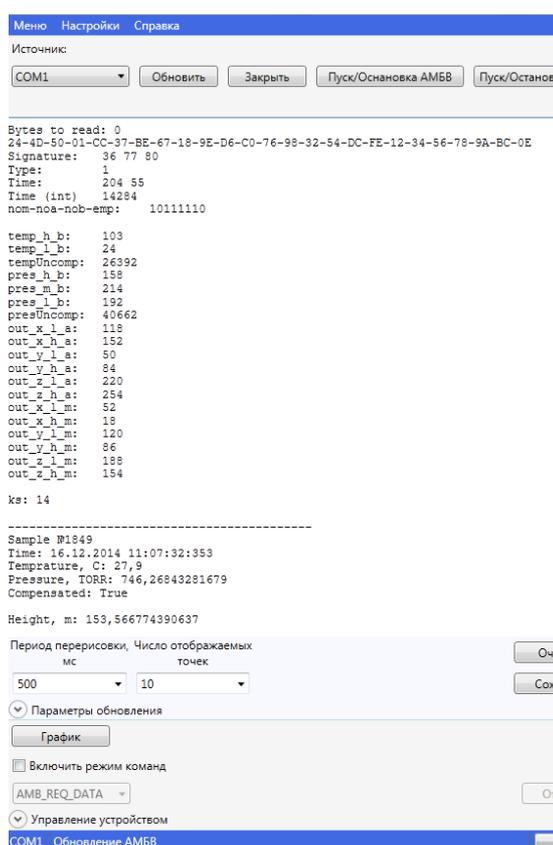


Рис.4. Окно программы

Для борьбы с указанными недостатками датчик предлагается использовать после предварительной выставки, которая производится следующим образом. Датчик располагается неподвижно, и в течение некоторого времени считываются его показания. Очевидно, истинная его высота неизменна, однако прибор фиксирует её приращения. После накопления достаточного числа измерений производится оценка характера возникающих погрешностей, а высота датчика принимается за начало отсчёта путём осреднения ранее накопленных измерений. Измерения высоты проводятся в относительном режиме путём суммирования, смещений от начального положения.

Для практического исследования использована плата с размещёнными на ней барометром, микроконтроллером и микросхемой согласования логических уровней микроконтроллера и линии RS232, а также розеткой COM-порта. Микроконтроллер инициирует измерения температуры и давления, принимает их результат, формирует пакет сообщения и отправляет его через UART на ПК. Со стороны ПК приём пакетов обрабатывается специально написанной для обработки данных показаний барометра программой.

Вид окна программы представлен на рис. 4. Она позволяет при работе с барометром получать данные о давлении и температуре окружающего воздуха, а также рассчитывать в соответствии с ними высоту над уровнем моря.

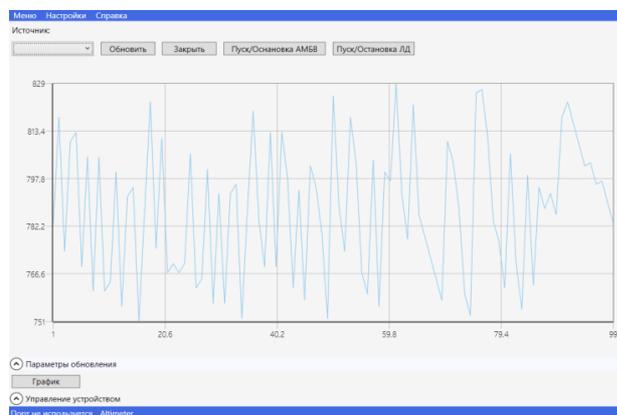


Рис.5. Пример графического вывода информации

графика» (рис. 5).

При моделировании системы обработки информации необходимо сформировать модели внешних воздействий и ошибок измерений, представляемых, как правило, стационарными процессами с заданными свойствами. Свойства стационарного процесса описываются его корреляционной функцией и спектральной плотностью. Для определения свойств сигнала прибора, при помощи пакета MATLAB, был произведен расчет корреляционной функции, и получено её представление в аналитическом виде:

$$k(\tau) = \sigma_1^2 e^{-\alpha_1 \tau} + \sigma_2^2 e^{-\alpha_2 \tau} \quad (2)$$

Аппроксимация корреляционной функции зависимостью (2) представлена на рис. 8.

По известному соотношению [2] корреляционной функции сигнала с его спектральной плотностью был произведен аналитический расчет спектральной плотности:

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} k(\tau) \exp(-j\omega\tau) d\tau = \frac{2\sigma_1^2 \alpha_1}{\alpha_1^2 + \omega^2} + \frac{2\sigma_2^2 \alpha_2}{\alpha_2^2 + \omega^2} \quad (3)$$

Для формирования стационарного процесса используется метод формирующего фильтра, рассчитанного таким образом, чтобы при подаче на вход фильтра белого шума единичной амплитуды его выходной сигнал обладал указанными характеристиками. Для получения передаточной функции формирующего фильтра спектральную плотность моделируемого процесса подвергают факторизации, т.е. представляют её в виде

произведения двух комплексно-сопряженных сомножителей, все нули и полюса первого из которых лежат в левой полуплоскости, а второго — в правой:

$$S(\omega) = W_{\text{фф}}(j\omega)W_{\text{фф}}(-j\omega). \quad (4)$$

После несложных математических преобразований получим:

$$W_{\text{фф}}(p) = \frac{p\sqrt{2\sigma_1^2\alpha_1+2\sigma_2^2\alpha_2} + \sqrt{2\sigma_1^2\alpha_1\alpha_2^2+2\sigma_2^2\alpha_2\alpha_1^2}}{p^2 - (\alpha_1 - \alpha_2)p + \alpha_1\alpha_2}. \quad (5)$$

Модель формирующего фильтра может быть представлена в форме пространства состояний:

$$\begin{cases} \dot{x} = Fx + Gu \\ y = Hx \end{cases}, \quad (6)$$

где  $x$  — вектор состояния фильтра,  $F$  — матрица динамики,  $G$  — матрица возмущений,  $H$  — матрица наблюдения.

Начальное состояние фильтра  $x(0)$  должно быть сформировано таким образом, чтобы обеспечить стационарность выходного процесса. Это условие выполняется, если ковариационная матрица  $P$  вектора состояния в начальный момент времени соответствует её установившемуся значению, которое может быть найдено из уравнения:

$$FP + PF^T + GG^T = 0. \quad (7)$$

Поскольку при компьютерном моделировании случайный процесс неизбежно должен быть представлен своими дискретными отсчетами, от непрерывной модели осуществляется переход к её дискретному описанию:

$$\begin{cases} x[k] = \Phi x[k-1] + \Gamma u[k-1] \\ y[k] = Hx[k] \end{cases}, \quad (8)$$

где  $u[k]$  — дискретный белый шум.

Параметры дискретной модели в первом приближении могут быть определены из соотношений:

$$\Phi \approx E + F\Delta t \quad (9)$$

$$\Gamma \approx G\Delta t.$$

Ниже (Рис.6.) представлен результат моделирования сигнала прибора с использованием программы MATLAB.

Анализируя графики корреляционных функций, стоит обратить внимание на их схожесть. Таким образом, производя расчет формирующего фильтра для различных внешних условий, возможно получение более сглаженного сигнала с прибора.

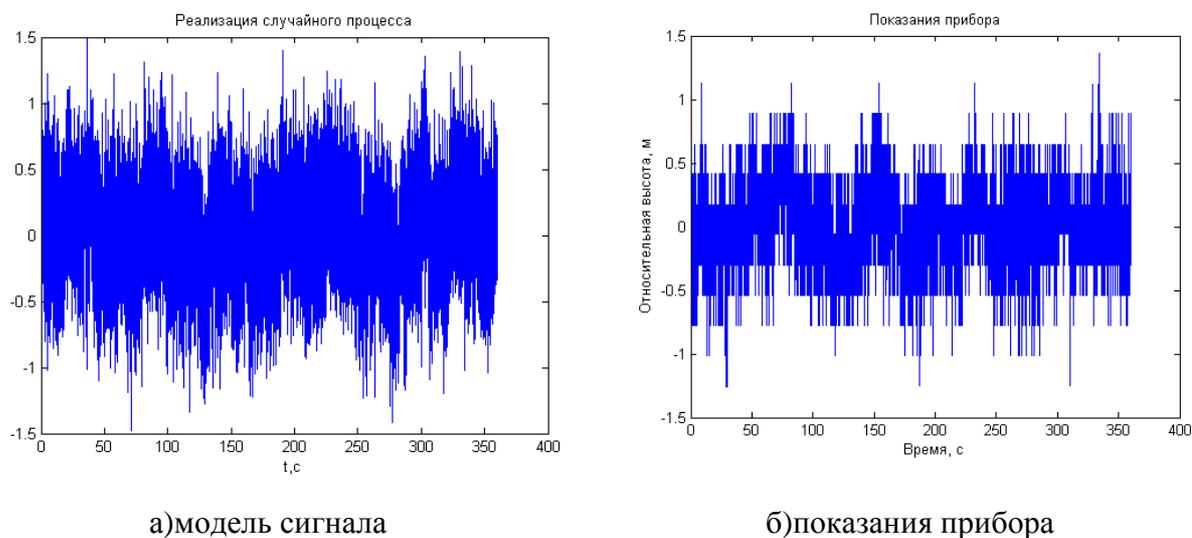


Рис. 6. Сопоставление показаний прибора и его модели

## Выводы

Показана возможность моделирования стационарных шумов выходного сигнала микромеханического барометра использованием метода формирующего фильтра. По известной реализации случайного процесса измерения была получена корреляционная функция, подлежащая аппроксимации и моделированию. Модель, полученная в пространстве состояний, показывает высокую степень соответствия показаниям физического датчика.

В представленном виде, однако, модель не учитывает влияния различий в погодных условиях: влажности, температуры воздуха и др. Это обстоятельство может быть разрешено путём калибровки модели при различных заранее известных условиях измерений.

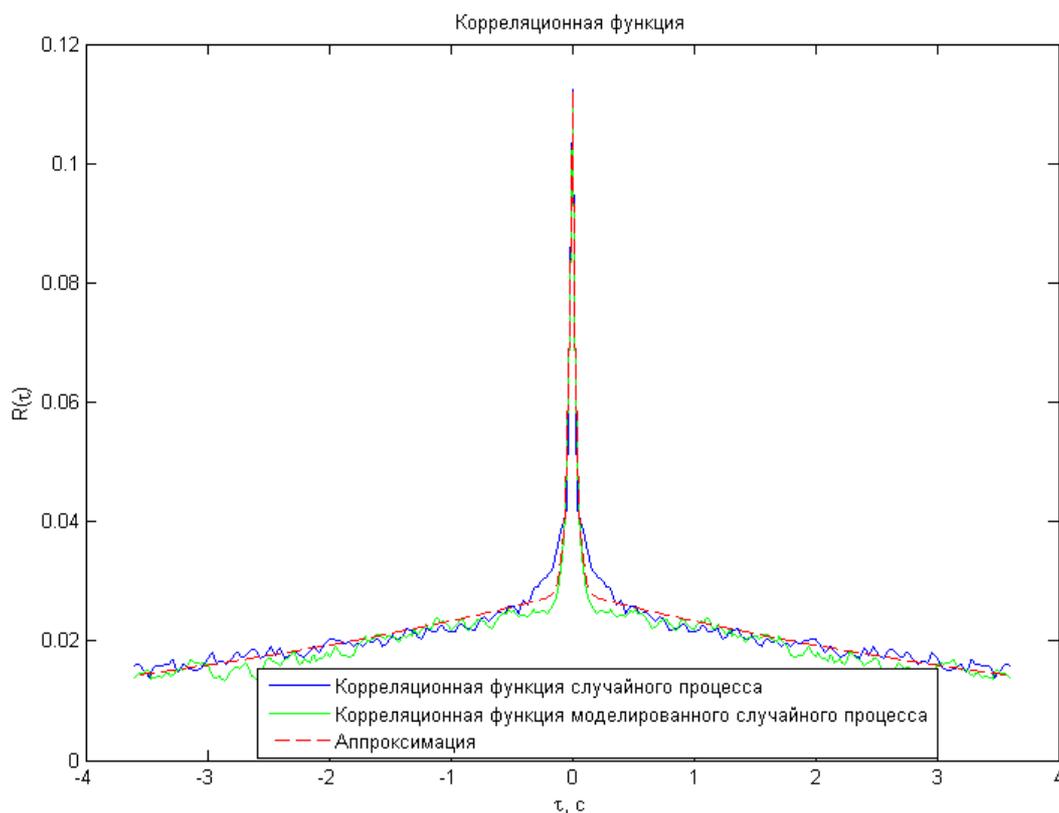


Рис. 7. Сравнение АКФ показаний прибора и модели

### Список литературы

1. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов: пер. с англ. М.: Мир, 1974. 463 с. [Bendat J.S., Piersol A.G. Random Data: Analysis and Measurement Procedures, Wiley-Interscience, New York, 1971].
2. Бендат Дж., Пирсол А. Применения корреляционного и спектрального анализа: пер. с англ. / под ред. И.Н. Коваленко. М.: Мир, 1983. 312 с. [Bendat J.S., Piersol A.G. Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis, Wiley-Interscience, New York, 1980].
3. Степанов О.А. Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. В 2 ч. Ч. 1. Введение в теорию оценивания. СПб: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2009. 496 с.
4. Степанов О.А. Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. В 2 ч. Ч. 2. Введение в теорию фильтрации. СПб: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2012. 417 с.
5. Половинкин А.А. Основы общего землеведения. М.: Учпедгиз, 1958. 356 с.

6. Ривкин С.С. Стабилизация измерительных устройств на качающемся основании. М.: Наука, 1978. 320 с.