

Література

1. Медико – демографічна ситуація та організація медичної допомоги населенню у 2011 році [Текст] / за ред. О.В. Аніщенко. – Міністерство охорони здоров'я України, Київ, 2012. – 103 с.
2. Cowley, A. W. Long-term control of arterial blood pressure [Text] // A. W. Cowley, Jr. Physiol // Circular Researchers. – January 1, 1992. – Vol. 72, № 1. – P. 231-300.
3. Euler, U. S. Observations on the pulmonary arterial blood pressure [Text] / U. S. Euler, G. Liljestrand // Acta Physiologica Scandinavica. – August 1996. – Vol. 12, Issue 4. – P. 301–320.
4. Arthur, C. Arterial pressure regulation [Text] / C. Arthur, M. D. Guyton, G. Thomas // The American Journal of Medicine. – May 1992. – Vol. 52, Issue 5. – P. 584-594.
5. O'Rourke, M. Arterial stiffness, systolic blood pressure, and logical treatment of arterial hypertension [Text] / M. O'Rourke // Hypertension. – 1990. – Vol. 15. – P. 339-347.
6. McKenna, M. The ratio of ankle and arm arterial pressure as an independent predictor of mortality [Text] / M. McKenna, S. Wolfson, L. Kuller // Atherosclerosis. – April, 1991. – Vol. 87, Issues 2. – P. 119–128.
7. McVeigh, G. E. Age-Related Abnormalities in Arterial Compliance Identified by Pressure Pulse Contour Analysis [Text] / G. E. McVeigh, C. W. Bratteli, D. J. Morgan // Hypertension. – 1999. - Vol. 33. – P. 139-142.
8. Шнырев, А. П. Особенности корреляции артериального давления и показателей физического развития [текст] / А.П. Шнырев // Материалы VI конгресса по детской нефрологии. – Москва, 19-21 сентября, 2007 г. – С. 109.
9. Настенко, Е. А. Анализ состояния системы кровообращения и микроциркуляторного русла на основе функциональных показателей [текст] / Е.А. Настенко, Е.К. Носовец, С.В. Зубков // Биомедицинская инженерия. – 2011. - №2. – С.42-47.
10. Книшов, Г. В. Оцінка стану системи кровообігу за процентильними діаграмами «вік-тиск» в гендер-однорідних групах [текст] / Г.В. Книшов, Є.А. Настенко, О.К. Носовець // Щорічник наукових праць Асоціації серцево-судинних хірургів України. – 2012. - № 20. – С. 230-235.
11. Winesett, J. Web Application Development with Yii and PHP [Text] / J. Winesett // Packt Publishing. – November 19, 2012. – 332 p.

Визначені джерела і величини похибок високоточної системи локального позиціонування, що використовує ультразвуковий канал для визначення місцезнаходження і радіоканал для синхронізації. Створена і досліджена математична модель описуваної системи. В результаті аналізу отриманих даних запропоновано можливі методи зниження величин похибок, що дозволяють істотно підвищити точність визначення координат

Ключові слова: система локального позиціонування, базова станція, УЗ випромінювач, УЗ мітка, похибка

Определены источники и величины погрешностей высокоточной системы локального позиционирования, использующей ультразвуковой канал для определения местоположения и радиоканал для синхронизации. Создана и исследована математическая модель описываемой системы. В результате анализа полученных данных предложены возможные методы снижения величин погрешностей, позволяющие существенно повысить точность определения координат

Ключевые слова: система локального позиционирования, базовая станция, УЗ излучатель, УЗ метка, погрешность

УДК 621.396.96

РАСЧЁТ ПОГРЕШНОСТЕЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СИСТЕМЫ ЛОКАЛЬНОГО ПОЗИЦИОНИ- РОВАНИЯ

В. А. Ливнов

Аспирант

Кафедра основ радиотехники

Харьковский национальный университет

радиоэлектроники

пр. Ленина, 16, г. Харьков, Украина, 61166

E-mail: Vetal_hi-tech@mail.ru

1. Введение и постановка проблемы

Описываемая в настоящей работе система локального позиционирования (далее – система) имеет высо-

кую точность благодаря использованию УЗ волн для определения местоположения объектов и ЭМ канал для синхронизации и обмена информацией, в отличие от спутниковых навигационных систем, которые ис-

пользуют ЭМ канал и для навигации, и для синхронизации [1]. Так как ультразвук имеет длину волны на 6 порядков меньшую, чем электромагнитные волны, при одинаковых частотах излучения, это позволило достичь точность системы до нескольких сантиметров [2 – 4].

Но на работу подобной системы влияет немалое количество источников погрешностей и игнорирование последних может негативно сказаться на результатах работы системы [5, 6].

В рамках данной статьи будет проведён анализ источников погрешностей системы и оценены величины этих погрешностей.

2. Литературный обзор

В [6] приводится вариант расчёта модели погрешностей трёхкоординатной инерциальной навигационной системы. В модели присутствуют такие источники погрешностей, как погрешности геометрии (перекося), ошибки масштабов, смещение нулей и составляющие типа белого шума.

Для данной статьи интерес представляют только два последних источника погрешностей, так как остальные не могут присутствовать в ультразвуковой системе навигации.

В [5] производится анализ и систематизация всех возможных источников погрешностей ультразвуковой системы локального позиционирования, но в данном источнике не производится расчёт величин погрешностей.

В [2 – 4] приведен принцип работы описываемой здесь системы позиционирования.

Система использует УЗ волны с несущей частотой 40 кГц, позволяющие получить линейную точность менее 1 см. Структурная схема системы приведена на рис. 1. Она состоит из следующих модулей:

– Базовая станция (1). Это центральное связующее звено в системе.

Она предназначена для формирования импульсов, которые подаются на УЗ излучатели (1.1 и 1.2) и преобразуются ими в звук (в зонд-сигналы). Также она обеспечивает опрос меток (3) по радиоканалу и передачу полученных данных в ПК (4).

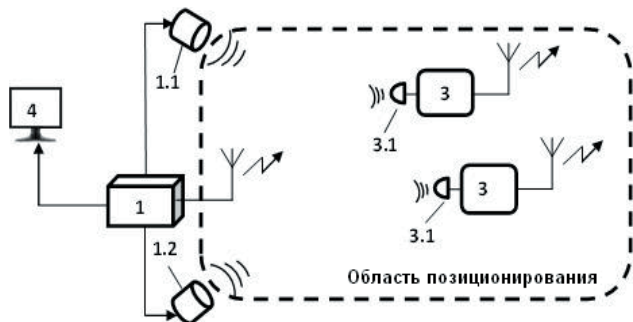


Рис. 1. Структурная схема системы

– УЗ метки (3). Это микропроцессорные устройства, имеющее в своём составе УЗ приёмники (3.1). Они устанавливаются на объекте позиционирования. Метки обеспечивают приём УЗ датчиками зонд-сиг-

налов, их обработку и обмен информацией с базовой станцией по радиоканалу.

– Персональный компьютер (4). Программное обеспечение для ПК анализирует полученные данные, рассчитывает координаты меток, выводит результаты на экран в графическом и численном виде.

3. Источники погрешностей и их расчёт

3. 1. Математическая модель измерительной части системы

В описываемой системе определение местоположения объектов выполняется путём измерения расстояния от навигационных точек до движущихся объектов, которое, в свою очередь, определяется импульсным ультразвуковым методом. Этот метод основан на измерении времени распространения УЗ сигнала $\tau_{и}(t) = \frac{l(t)}{c(t)}$ от излучателя к приёмнику через контролируемую среду, по которому при известной скорости звука $c(t)$ можно найти путь, пройденный сигналом. Измерение времени распространения сигнала осуществляется путём измерения промежутка времени с момента излучения акустического сигнала в исследуемую среду до момента его приёма и преобразования в электрический сигнал.

Измеренная величина пропорциональна сумме временных задержек в акустическом канале и электронных цепях.

Данный метод называется прямым и подробно описан в [7].

Структурная схема ультразвуковой измерительной части системы (УЗ метка) представлена на рис. 2.

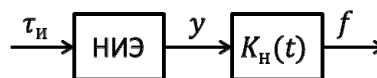


Рис. 2. Структурная схема системы измерения времени распространения УЗ сигнала прямым методом

Нелинейный импульсный элемент (УЗ приёмник) описывается уравнением

$$\tau_{и}(t) = \frac{l(t)}{c(t)}, \tag{1}$$

где зависимость относительного фазового смещения принятого УЗ импульса φ от измеряемого сигнала $\tau_{и,nT}$ определяется модуляционной характеристикой. Тогда для выходного сигнала $f(t)$ можно записать

$$f(t) = \sum_{m=0}^{\infty} k[\tau_{и}(mT), t - mT],$$

где

$$k[\tau_{и}(mT), t - mT] = \int_0^t N[\tau - mT - T\varphi(\tau_{и}(nT))] k_{и}(t - \tau) d\tau,$$

$$N(t) = 1(t) - 1(t - \gamma T),$$

γ – постоянная относительная ширина импульса;
 $k_n(t)$ – весовая функция непрерывной части. С учётом последней формулы получим

$$k[e(nT), t - nT] = \begin{cases} \int_0^{t - nT - T\varphi(e(nT))} k_n(\eta) d\eta n p n T + T\varphi(e(nT)) \leq t \leq nT + \varphi(e(nT)) + \gamma T \\ \int_0^{\gamma T} k_n(t - nT - T\varphi(e(nT))) d\eta n p n T + \varphi(e(nT)) + \gamma T \leq t. \end{cases}$$

Полагая $t = nT + \tau, 0 \leq \tau \leq T$, получим отсюда

$$k[e(nT), \tau] = \begin{cases} \int_0^{\tau - T\varphi(e(nT))} k_n(\eta) d\eta n p n T \varphi(e(nT)) \leq \tau \leq T\varphi(e(nT)) + \gamma T \\ \int_0^{\gamma T} k_n(\tau - T\varphi(e(nT)) - \eta) d\eta n p n T \varphi(e(nT)) + \gamma T \leq \tau. \end{cases}$$

Зная закон изменения $t_n = nT$ и используя формулу (1), можно найти процесс $f(t)$ на выходе измерительной системы в любой момент времени. Анализируя данную формулу, можно заметить, что модуляционная характеристика УЗ приёмника оказывает существенное влияние на точность определения временного положения УЗ импульса системой.

3. 2. Колебания скорости звука

Основным источником погрешностей является звуковой канал. Два фактора, такие как движение воздушных масс (ветер) или изменение температуры воздуха, влияют на скорость звука в УЗ канале [8]. Определим максимальную погрешность измерения расстояния до движущихся объектов при допустимых колебаниях температуры. Диапазон рабочих температур, при котором сохраняется нормальная функциональность всех элементов системы, составляет $t_1 = 10^\circ\text{C}$ от до $t_2 = 35^\circ\text{C}$. Скорость звука в газе рассчитаем по формуле:

$$\vartheta_{зв} = \sqrt{\frac{\gamma \cdot R(t + 273,15)}{M}},$$

где γ – показатель адиабаты (1,4 для воздуха);
 $R = 8,31$ Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная;
 t – температура воздуха в градусах Цельсия;
 M – молярная масса (0,029кг/моль для воздуха).
 Подставив значения констант в формулу, получим:

$$\vartheta_{зв} = 20\sqrt{t + 273,15}.$$

Разница скоростей для температур и составляет:

$$\Delta\vartheta_t = \vartheta_{зв2} - \vartheta_{зв1} = 20(\sqrt{t_2 + 273,15} - \sqrt{t_1 + 273,15}).$$

Для расчёта расстояния в системе используется значение скорости звука для температуры 20°C : $\vartheta_p = 342,43$ м/с. Тогда половина интервала погрешности измерения расстояния, выраженная в процентах, составляет:

$$\Delta l_t = l \Delta \frac{\Delta\vartheta_t}{2 \cdot \vartheta_p} = 0,029 \cdot l (\sqrt{t_2 + 273,15} - \sqrt{t_1 + 273,15}), \quad (2)$$

где l – расстояние от УЗ излучателя до объекта позиционирования.

Движение воздушных масс в звуковом канале также оказывает значительное влияние на точность позиционирования. Так как система предназначена для работы внутри помещений или спортивных стадионов, скорость ветра не превышает значения $\vartheta_b = 5$ м/с. учётом того, что ветер, в зависимости от направления, может как ускорить, так и замедлить распространение зонд-сигнала, разница скоростей звука будет равна $\Delta\vartheta = 2\vartheta_b = 10$ м/с. По формуле 2 погрешность измерения расстояния будет равна:

$$\Delta l_b = l \cdot \frac{2\Delta\vartheta_b}{2 \cdot \vartheta_p} = 0,0146 \cdot l.$$

3. 3. Канальные и аппаратные шумы

Ещё одним источником погрешности являются шумы, присутствующие в звуковом канале и вносимые самой системой. Экспериментально определено, что соотношение сигнал/шум на выходе УЗ датчика составляет 10, а шумами, вносимыми усилителем, можно пренебречь. На основе этого была создана модель системы в системе Mathcad, при помощи которой была получена гистограмма абсолютной погрешности оценки времени положения УЗ сигнала (рис. 3).

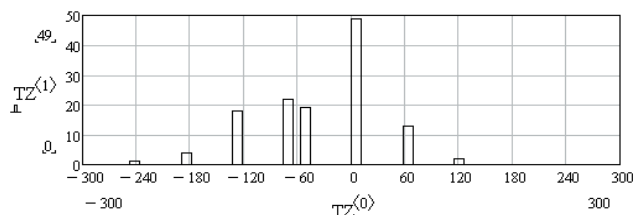


Рис. 3. Гистограмма абсолютной погрешности оценки

Из рис. 3 видно, что погрешность составляет два периода несущей частоты в большую сторону и 4 периода – в меньшую. Подобная несимметричность вызвана тем, что сигнал на выходе УЗ датчика, который является избирательной системой, нарастает не по линейному закону, а по экспоненциальному [9]. Длина волны несущей частоты составляет 0,86 см, следовательно, погрешность определения расстояния составит $\Delta l_3 = -3,44$ см в меньшую сторону и $\Delta l_3 = +1,72$ см – в большую. Для того, чтобы однозначно определить последнюю погрешность, примем с запасом, что $\Delta l_3 = \pm 3,44$ см.

Рассчитаем суммарную погрешность из этих трёх слагаемых:

$$\Delta l = \Delta l_t + \Delta l_b + \Delta l_3 = 0,044l (\sqrt{t_2 + 273,15} - \sqrt{t_1 + 273,15}) + 0,0344. \quad (3)$$

Предельное расстояние, на котором система еще нормально функционирует, составляет $l = 20$ м, поэтому определим максимальную погрешность измерения для этого расстояния: $\Delta l(20) = \pm 0,7$ м.

3. 4. Погрешность определения координат меток

Но последняя погрешность измерения расстояния от УЗ излучателей до УЗ меток является необработанной. Определим, насколько эта погрешность увеличится после определения координат меток.

На рис. 4 схематически изображена ситуация в области позиционирования. Здесь в точках А, В расположены излучатели, в точке С – УЗ метка, АВ – расстояние между излучателями (база). АО=х, ОС=у – координаты метки, которые необходимо найти, АС – измеренное расстояние от первого УЗ излучателя до УЗ метки, ВС – измеренное расстояние от второго УЗ излучателя до УЗ метки.

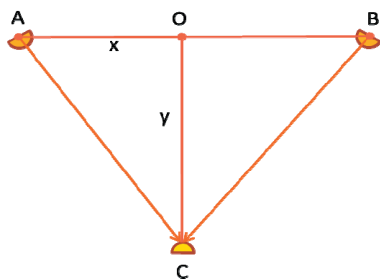


Рис. 4. Принцип определения координат УЗ метки

Координаты х и у находятся из треугольника ABC, у которого известны все стороны, а у=ОС – его высота из следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} OC^2 = AC^2 - AO^2 \\ OC^2 = BC^2 - OB^2 \\ OB = AB - AO \end{cases}$$

Решив данную систему, получим:

$$x = AO = \frac{AC^2 - BC^2}{2AB} + \frac{AB}{2},$$

$$y = OC = \sqrt{AC^2 - x^2}.$$

Определим зависимость погрешности определения координат от местоположения метки и величины базы между излучателями при помощи системы Mathcad. Примем базу АВ=20 м, расстояния АС и ВС равными и определим, во сколько раз увеличивается погрешность определения координаты у при различных значениях ординаты. График этой зависимости приведён на рис. 5.

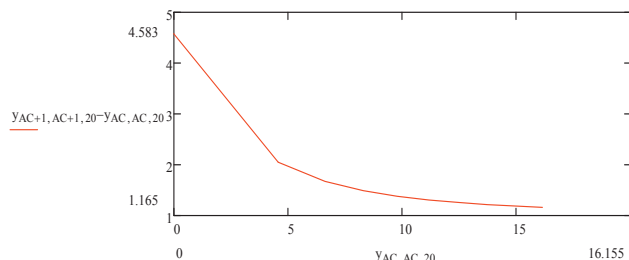


Рис. 5. Зависимость погрешности определения у от ординаты

Из рис. 5 видно, что наибольшая погрешность определения координаты установится тогда, когда ордината равна 0, т.е. когда УЗ метка приближается вплотную к базовому отрезку АВ и спадает по мере удаления от него.

Из рис. 5 видно, что в наихудшем случае данная погрешность больше необработанной в 4,6 раза.

Зависимость погрешности определения координаты х от различных значений ординаты показана на рис. 6.

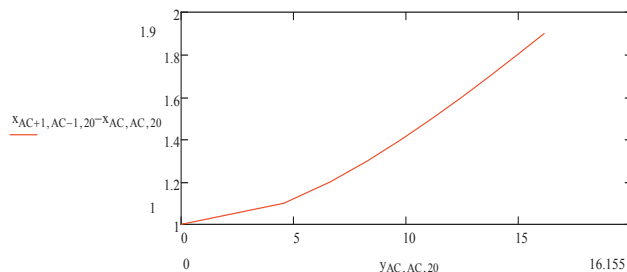


Рис. 6. Зависимость погрешности определения х от ординаты

Из рис. 6 видно, что последняя погрешность, наоборот, увеличивается при удалении от базового отрезка и превышает необработанную погрешность в 1,9 раз в худшем случае.

Рассчитаем наибольшую величину погрешности определения координаты у. Так как данная погрешность максимальна при нулевом значении ординаты, определим её именно для этого значения. При базе АВ=20 м и нахождении УЗ метки посередине базового отрезка, расстояния будут равны l=АС=ВС=10 м, а величина необработанной погрешности по формуле (3) составит Δl=±0,35 м. Тогда искомая погрешность Δу=4,6·Δl=1,61 м.

Аналогично найдём максимально возможную погрешность определения координаты х на максимальном удалении от базового отрезка при у=16,16 см (график, рис. 5). В этом случае расстояния будут равны l=АС=ВС=10 м, а величина необработанной погрешности Δl=±0,35 м была найдена выше. В итоге погрешность Δх=1,9Δl=0,67 м.

4. Выводы

Все вышеперечисленные источники погрешностей оказывают влияние на точность определения дальности от УЗ излучателей до УЗ меток.

После определения координат или оценки траектории движения объектов позиционирования (т. е. обработки) эти погрешности повлияют на результирующую погрешность системы в соответствии с дальномерным способом определения местоположения.

В результате анализа погрешностей ультразвуковой системы локального позиционирования были выведены необходимые расчётные формулы (3) – (5), при помощи которых была определена максимальная погрешность измерения расстояния от УЗ излучателя до метки, которая составила Δl=±0,7 м, а также погрешности определения координат метки: Δх=0,67 м, Δу=1,61 м.

Анализируя составляющие упомянутых погрешностей можно сделать вывод, что для устранения погрешности определения расстояния до метки необходимо в систему ввести модуль, определяющий

скорость звука в данный момент и в данном направлении; а для устранения погрешности измерения координат необходимо корректировать алгоритм их измерения.

Литература

1. Multi-Channel GPS/GLONASS Common-View between NIST and USNO [Текст] / V. S. Zhang, T. E. Parker, M. A. Weiss, F. M. Vannicola // IEEE International Frequency Control Symposium, June 2000, pp. 598-606.
2. Пат. 71860 Україна, МПК (2012.01) G01S 11/00. Спосіб ультразвукового локального позиціонування рухомих об'єктів [Текст]/ Лівнов В.О., Коваль Ю.О. (Україна), заявник та власник Харківський нац. університет радіоелектр. – № u2012 01318, подано 08.02.2012, опубл. 25.05.2012 бюл. №14.
3. Ливнов, В. А. Система ультразвукового позиционирования “Ultrasonic Marks” [Текст] /Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2011»: Материалы 7-й междунар. молодежной науч.-техн. конф., 11-15 апреля 2011 г. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2011. – 479 с.
4. Ливнов, В. А. Система ультразвукового локального позиционирования движущихся объектов. [Текст] / В. А. Ливнов // 16-й Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». Сб. материалов форума. Т. 3. – Харьков: ХНУРЭ, 2012. – 220 с.
5. Ливнов, В. А. Анализ погрешностей и неопределенностей системы позиционирования с ультразвуковым измерительным и электромагнитным информационными каналами [Текст] / В. А. Ливнов, Ю. А. Коваль // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2013. Вып. XXX.
6. Парусников, Н. А. Определение инструментальных погрешностей инерциальной навигационной системы на неподвижном основании [Текст] / Н. А. Парусников, В. В. Тихомиров, С. А. Трубников // Фундаментальная и прикладная математика, 2005, том 11, № 7, с. 159–166.
7. Хамидуллин, В. К. Ультразвуковые контрольно-измерительные устройства и системы. [Текст] / В. К. Хамидуллин. - Л.: Издательство Ленинградского университета. 1989. – 248 с.
8. Emmanuel, P. Papadakis (ed) Ultrasonic Instruments & Devices [Текст] / P. Emmanuel– Academic Press, 1999.
9. Petley, B. W. Time and frequency in fundamental metrology [Текст] / B. W. Petley // PIEEE. – 1991. – Vol. 79, No. 1. – pp 1070–1076.
10. Product & Service Advantage – Mathcad [Электронный ресурс] / PTC Inc – Режим доступа: \www/ URL: <http://blogs.ptc.com/product/mathcad/> – 11.12.13 г. – Загл. с экрана.