

## **По поводу точности определения координат попадания пули в сенсорный экран тира.**

В большом количестве моделей интерактивных тиров и мишеней – место попадания пули в мишенный щит из металла или пластика используются методы акустической эмиссии, и возможно, поэтому такие тирры иногда называют «ударными».

В общем случае, попадание пули в такой лист (или «сенсорный экран») - вызывает в нем концентрическую ударную волну, которую можно зафиксировать подходящими датчиками, расположенными на периметре листа. Далее, с помощью компьютера, вычисляются точные координаты попадания – после чего уже можно начислить очки в соответствии с точностью стрелка, изменить сюжет проецируемого на экран фильма и т.п.

Для ряда случаев - спортивных соревнований, например, или тренировочной стрельбы - важно определить место поражения мишени с максимально возможной достоверностью, поэтому вопрос их точности – один из самых актуальных для таких приложений.

Многие изготовители интерактивных экранов ( для огнестрельного оружия - т.н. «плит») декларируют, например, «точность 0,01мм» – во что трудно поверить – и, как кажется, так же трудно проверить.

В любом случае, представляются актуальными несколько простых соображений, касающихся пределов достижимой точности в этих, практически штучно, «hand-made» изготавливаемых устройствах.

Очевидно, что любое измерение – всегда имеет некую погрешность, обусловленную, как минимум, точностью самого измерительного инструмента.

Поэтому, некая ошибка в определении координат попадания будет присутствовать обязательно и вполне возможно оценить её размер.

**Общая точность** любого «ударного» тира - обусловлена следующими погрешностями:

- 1) Измерений времени для задержек прихода фронта ударной волны.**
- 2) Фиксации факта прихода ударной волны к каждому датчику – что, как будет показано ниже, в свою очередь зависит от конкретного места попадания пули в лист.**
- 3) Фактической геометрии листа и расположения на нем датчиков.**
- 4) Интерпретации результатов измерений, т.е. их сравнения с местом фактического попадания.**
- 5) Прочих факторов, приводящих к погрешностям - акустики выстрела, параметров удара, точности собственно вычислений, свойств датчиков и т.д. и т.п.**

Не вдаваясь в технические детали и тем более в «научные подробности», очень примерно оценим влияние этих обстоятельств на финальную, «практическую» точность ударного экрана.

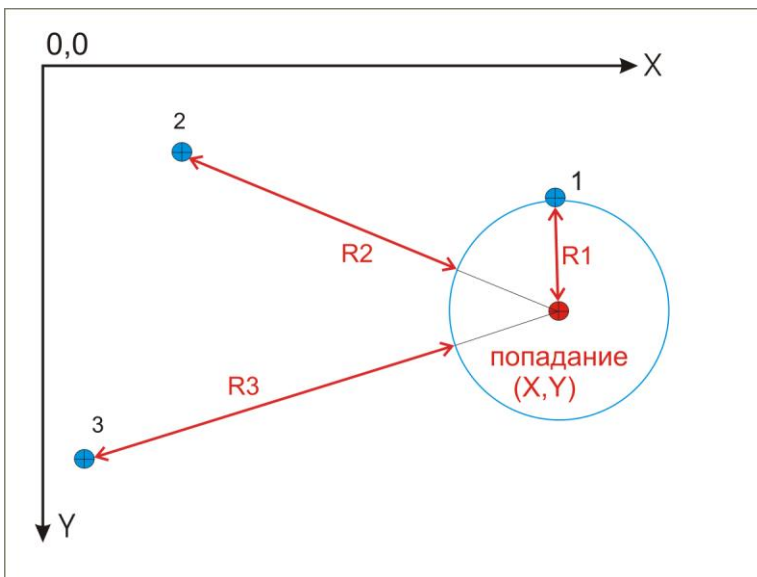
## 1. Точность измерения времени «задержек».

Зафиксировать факт прихода ударной волны в точку измерения возможно с помощью датчиков различных типов, и сигнал может быть снят как некой с плоскости, так и практически с «точки». Оба эти варианта принципиально одинаковы, и поэтому имеют «общие» погрешности.

Представим общий случай регистрации попадания пули классической схемой на рисунке.

Пусть из общего числа имеющихся на некоем листе и произвольным образом расположенных датчиков удара № 1 окажется самым близким к месту попадания, а №2 и №3 зарегистрируют удар позднее.

Очевидно, что мы можем производить измерения только после того, как датчик №1 зафиксирует сам факт удара, и наша задача состоит в определении (вычислении) расстояний R2 и R3.



Собственно «точность» определения координат (X,Y) - в конечном счете сводится к точному (заметим, в это же время косвенному, т.е. получаемому в результате вычислений) измерению расстояний от места попадания пули до устройств, регистрирующих это самое попадание (в нашем случае – датчиков №2 и №3).

Трудно себе представить иной способ вычислить расстояния R1 и R2, чем классический – умножить время на скорость:  $S = V \times T$  и нам, таким образом, необходимо точно измерить T и указать столь же точное значение скорости V.

Разумеется, измерять время мы будем не в секундах, а в более мелких единицах. Существующая (для наших целей) электроника по ряду причин накладывает ограничение на точность нужных нам измерений. Например, если генератор, который даёт нам счётные импульсы, делает это один раз в секунду, то и погрешность составит 1 секунду.

Образно говоря, если судья засекает время финиша спортсмена-бегуна, но при этом он не имеет возможности нажимать на свой секундомер чаще, чем один раз в секунду, рискует ошибиться именно на этот интервал. Предположим, что судья не видит спортсмена (так же как наш датчик «не видит» приближающуюся волну), а держит рукой финишную ленту.

В этом случае может случиться, что даже если спортсмен уже пересёк финиш, зафиксировать это факт судья с таким «секундомером» сможет лишь через почти секунду. Поэтому погрешность такого замера будет всегда положительна, но и всегда меньше, чем интервал измерения.

Пусть в нашем случае мы имеем часы, которые тикают с частотой 50MHz, а скорость распространения ударного фронта в листе (назовём её скоростью звука) нами совершенно точно установлена в 5 600 м/с.

Опять-таки говоря образно, наш секундомер не может быть «нажат» чаще, чем один раз за

$$1/50\,000\,000 = 0,000\,000\,02 \text{ сек}$$

Между тем за это время звук в листе может пройти расстояние

$$S = V \times T = 5\,600\,000 \text{ мм/сек} \times 0,000\,000\,02 \text{ сек} = 0,11 \text{ мм.}$$

Это означает следующее. Всякий раз, когда наш датчик **может** «нажать секундомер», - т.е. тем самым зафиксировать на наших часах-счетчиках факт прихода ударной волны – этот самый фронт ударной волны в этот момент - **уже** вполне может «проехать» датчик почти на **0,11мм**.

На практике все обстоит несколько хуже. «Часики» обычных микроконтроллеров тикают раз в пять медленнее, да и захват, или «нажатие кнопки секундомера» - может быть осуществлен не в каждый такт.

При использовании обычных PIC или AVR контроллеров (а это 90% всех таких тиров) с захватом до реальных 10-12Mhz - соответственно, ошибка может составить **0,5мм** на этом этапе.

Итак, для реального тира, с быстрой схемотехникой захвата (например, на ПЛИС) - только одно это обстоятельство ограничит точность **0,11мм** – и это – случайная величина, скорректировать которую невозможно.

## 2. Фиксация факта прихода ударной волны к каждому датчику.

Не вдаваясь в физику распространения фронта ударной волны – просто примем за данность следующую ситуацию.

Так или иначе, по нашему листу-экрану идет волна «возмущения» – и есть некий датчик, который способен отличить две ситуации: а) есть сигнал и б) нет сигнала.

Природа нашего сигнала (как впрочем, и любого другого) - такова, что он увеличивается совсем не мгновенно, а нарастает постепенно.

При этом, у датчика есть некий порог чувствительности – так что при одном, малом уровне «возмущения» он полагает, что волна **ещё** не пришла, а при другом, чуть большем – что **уже** пришла.

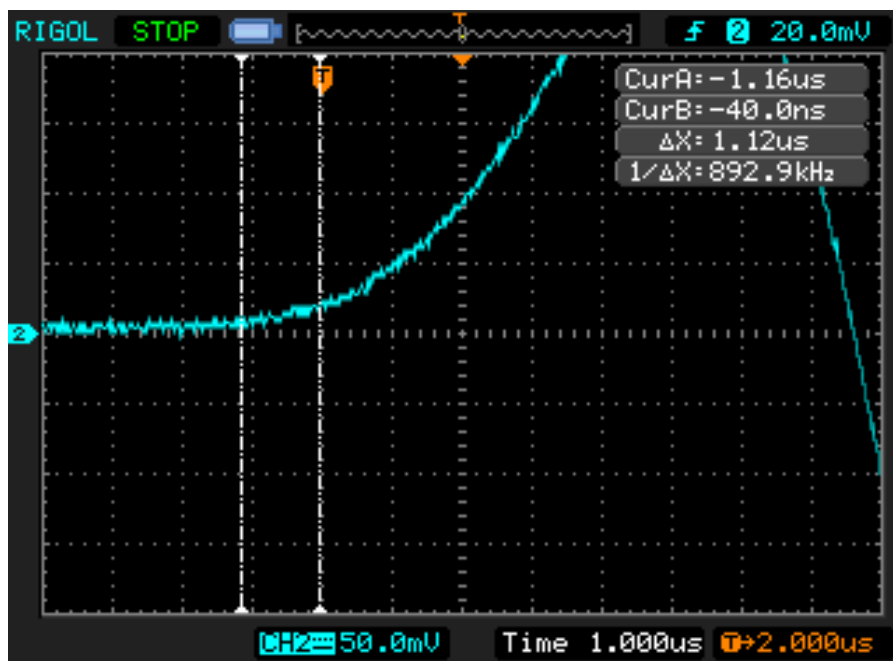
Как видно из фото ниже, ошибка в установке этого порога в пределах допустимой погрешности большинства приборов (0,1%) – например на 0,001v – может привести к ошибке в оценке времени на 1µS – и за это время ударная волна пройдет **0,5мм...**

Есть одно важное обстоятельство. Природа так устроена (и это не изменить) – что по мере движения фронта волны – он теряет энергию, затухает. Там конечно присутствует много разных эффектов, но, так или иначе - чем дальше от эпицентра волна – тем она слабее, и её фронт – более пологий.

Поэтому фронт волны от близкого (к датчику) попадания – круче, чем от далекого.

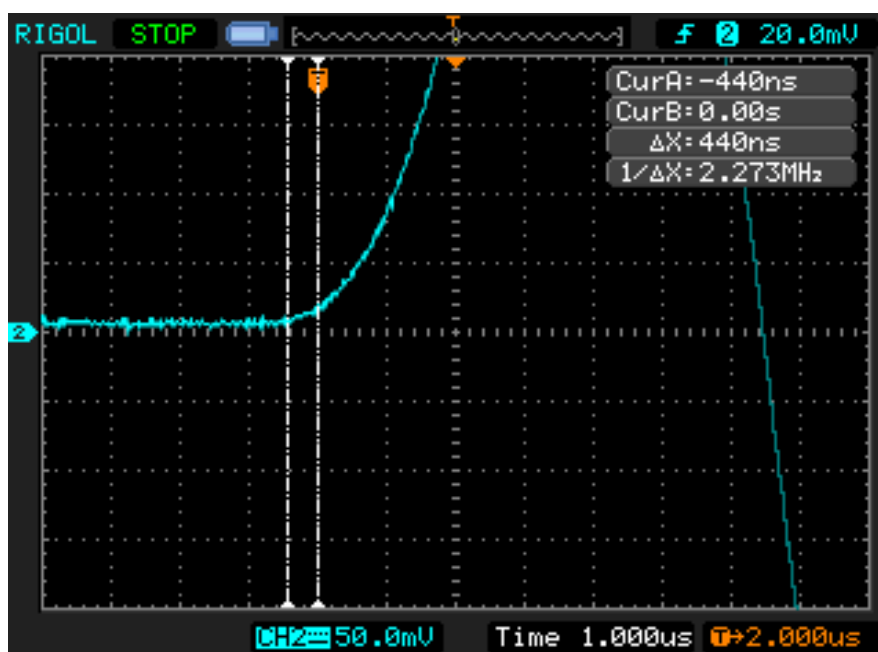
Таким образом, датчик, настроенный заранее на некий порог срабатывания, на самом деле сработает в разных местах фронта для случая близкого и далекого попадания пули в экран, т.е. возникает ошибка, зависящая от места поражения мишени.

Например, здесь показан сигнал датчика о «далеком» (25см) попадании пули в лист брони:



Видно, что за время около 1,12μs сигнал достиг уровня «включения» датчика в 20мв.

Ниже – сигнал от «близкого» (5см) попадания пули в тот же самый лист (тот же датчик):

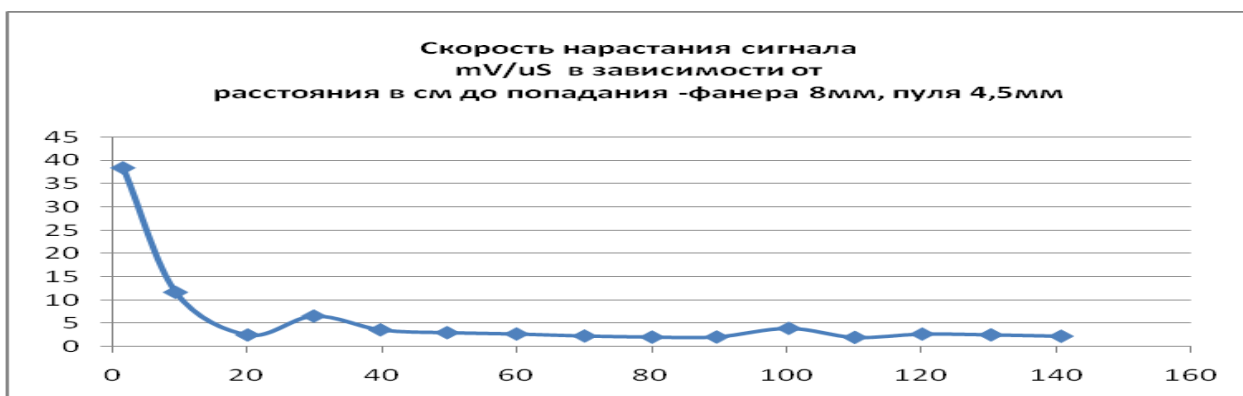


Сигнал сильнее, фронт круче, и тот же датчик, настроенный на те же «пороговые» 20мв - «включился» уже через 0,44μs – т.е. на 0,68μs быстрее.

**За это время звук в металле пройдет около 3,8мм...**

Таким образом, в зависимости от того, куда именно попала пуля, наш датчик может ошибиться на несколько мм(!).

Эта зависимость присутствует не только для металлических плит – но и для любых других. Вот так она выглядит например для фанеры (экспериментальные данные):



Видно, что эту нелинейную функцию на достаточном удалении от датчика можно принять линейной и уже программно «компенсировать» некой коррекцией. Это обстоятельство учитывается изготовителем – весь экран разбивается на зоны, для каждой из которых вводятся поправки, коэффициенты коррекции и т.п. Однако для небольших экранов, как видно из графика, это гораздо сложнее.

Но сколько бы таких зон не было – определение точки попадания всегда будет результатом некой интерполяции и поэтому иметь неизбежную неточность.

На практике это означает, что за счет невозможности установить абсолютно одинаковые (и к тому же нестабильные – зависящие от температуры например) - пороговые напряжения для датчиков, а так же изменения скорости нарастания сигнала в зависимости от места поражения мишени, неопределённость в вычислении координат положения эпицентра составляет с среднем **0,2мм**.

### 3. Фактическая геометрия листа и расположение на нем датчиков.

подавляющее большинство математических моделей для вычисления координат попадания пули – предполагают «жесткую» геометрию установки датчиков на мишенный щит – квадратом, например, равнобедренным треугольником и т.п.

Вряд ли возможно сделать измерения намного более точные, чем точность «измерительного инструмента». Поэтому, если мы хотим достичь, например, точности 0,01мм – следует соблюдать такую же точность и при изготовлении нашего экрана - и любая погрешность в размерах системы из металлической плиты и закрепленных на ней датчиков – повлечет за собой соответствующие искажения в результатах вычислений.

Трудно представить себе позиционирование «точечного» датчика, на самом деле имеющего пятно контакта с экраном диаметром 1,5-3мм - строго на «своем» месте с точностью 0,01мм. С учетом того, что датчик вполне может прилегать не всей плоскостью контакта, а лишь его частью например (ошибка 0,7мм!).

Или, например центр чувствительности датчика вполне может лежать не в его геометрическом центре, так что не вполне корректно принимать его за «точку». Самый мелкий из подходящих и доступных - собственно, далеко не «точка» (площадь контакта с листом - 1,5мм<sup>2</sup>).

Тот тип датчиков, которые контактируют с экраном не в точке, а плоскостью – на грани например – точно так же, реагируют на приход фронта волны далеко не какой-то конкретной точкой прилегания, а некой его неопределенной областью.

Можно, вероятно, допустить, что лист размером 300х300мм толщиной 10мм – изготовлен с точностью 0,003% - хотя эта величина больше напоминает о тепловом его расширении - но представляется, что изделие такого качества окажется неприемлемо дорогостоящим.

Можно в связи с этим обоснованно допустить, что ошибка, вызванная не точной геометрией, составляет минимально **0,1мм**.

#### **4. Интерпретации результатов измерений, т.е. их сравнения с местом фактического попадания.**

Очевидно, для установления того, насколько точны вычисленные координаты поражения мишени – необходимо иметь данные о фактических координатах поражения для их сравнения.

В результате, все погрешности нашего определения координат будут оцениваться путем сравнения их с координатами пулевых отверстий на бумажной мишени.

Определение точных координат пулевых пробоин - в первую очередь связано с тем фактом, что у этой окружности – отсутствует, «выбит» её центр. Таким образом, необходимо установить измеритель (например, штангенциркуль, имеющий точность по нониусу 0,1мм) – в центр отверстия «строго на глаз».

Другой вариант – применить некий прозрачный трафарет, отверстие которого можно совместить с пулевой пробоиной, как кажется, более точно. Однако тут возникнут вопросы по поводу точности изготовления такого трафарета и главное – точности отсчета его позиционирования на мишени. Очевидно, что даже идеально совместив отверстия – необходимо на какой-то шкале определить расстояние от края мишени – и вряд ли точность нанесенной на него шкалы - точнее, чем шкала штангенциркуля.

Вполне можно сказать, что собственно, положение центра пулевого отверстия - визуально угадывается человеком - но предположим, что это делается идеально точно. В любом случае необходимо считать показания некой шкалы - «штангенциркуля» - т.е. минимум **0,1мм**.

Другой важный вопрос - относительно чего необходимо измерить это расстояние – от края бумажной мишени или от края экрана – т.е. возникает ещё и погрешность позиционирования собственно бумажной мишени...

Если позиционировать мишень путем совмещения её оси и центра экрана – например путем прокола иглой – т.е., фактически, по одной точке. Возникают вопросы – насколько точно сделан этот прокол и насколько параллельны грани бумажной мишени и экрана.

Таким образом, невозможно гарантированно считать координаты пулевых пробоин на бумажной мишени, установленной вручную (а тем более с помощью степлера на резиновом листе), – точнее **0,1мм**.

## 5. Прочие факторы, приводящие к погрешностям

Несколько других обстоятельств вносит неопределенность в измерение координат поражения мишени.

Мишенный лист – фактически является большим микрофоном. Акустический фон помещения, где он установлен (выстрелы, громкое звуковое сопровождение и т.п.) - в той или иной мере улавливается датчиками, отчего на них может присутствовать некий сигнал. Поэтому, уже при реальном «нашем» выстреле, полезный сигнал будет развиваться не от нулевого уровня, и датчики сработают несколько раньше – что вызовет погрешности, о которых говорилось выше.

Особенно это касается случаев, когда звук выстрела приходит к нашему «микрофону» раньше, чем прилетает пуля, т.е. с оружием, имеющим дозвуковые скорости пули. В такой ситуации – вполне возможно, что датчики сработают раньше собственно удара пули, и определение координат попадания станет невозможным вообще.

Очевидно, что если перед металлическим экраном есть антирикошетный слой резины, например или даже неплотно прикрепленная бумажная мишень – то звук от её пробития пулей в таких случаях дойдет до собственно экрана быстрее, чем пуля. Уровень сигнала на датчиках от этого – повысится, отчего не исключено, что они сработают раньше, т.е. с некоторой ошибкой.

Так же, что будет существовать некая разница в мощности удара пули – и следовательно, в скорости нарастания сигнала вместе с сопутствующей ошибкой - в зависимости от типа оружия, массы и скорости пули. Поэтому, на одном и том же экране возможны разные погрешности для разных дистанций стрельбы и видов оружия.

Кроме того, неизбежны погрешности, связанные со свойствами определенных типов датчиков, так как они имеют очень разные характеристики, их экземпляры не строго идентичны, а параметры электроники, усиливающей и обрабатывающей их сигнал – так же имеет некие «разбросы».

Наконец, сами вычисления, производимые в контроллере или компьютере, всегда будут иметь некую неточность - за счет округлений, приближений и т.п. – не говоря уже о том, что все существующие на сегодня методики измерения «скорости звука» - дают разные результаты для одной и той же среды.

В связи с тем, что ошибки, вызванные вышеизложенными в этом разделе обстоятельствами, могут быть велики настолько, что сделают вычисления вообще невозможными – можно условно принять соответствующую ошибку, как минимально неизбежную - в среднем **0,1мм**.

## Общая точность определения координат

В результате, все указанные выше погрешности суммируются:

- |                                                                    |        |
|--------------------------------------------------------------------|--------|
| 1. Ошибки определения времени.....                                 | 0,1 мм |
| 2. Неточности в фиксировании факта прихода ударной волны.....      | 0,2 мм |
| 3. Связанные с не идеальной геометрией экрана и датчиков.....      | 0,1 мм |
| 4. Погрешности интерпретации и сравнения результатов выстрела..... | 0,1 мм |
| 5. Прочие погрешности .....                                        | 0,1 мм |

Лишь некоторые из упомянутых погрешностей можно считать регулярными и поддающимися в разной степени корректировке или уточнению.

Другие, случайные ошибки - иногда можно принять за «включающие» друг друга или даже компенсирующими одна - другую.

Однако, при неблагоприятных обстоятельствах, не исключено, что все эти погрешности и сложатся неблагоприятным образом.

Поэтому, применительно к реальному устройству определения координат попадания – можно утверждать, что **физически невозможно** гарантировать определение этих координаты точнее, чем со случайной погрешностью порядка 0,5-0,6мм при использовании для вычислений алгоритмов, «привязанных» к любой конкретной схеме расположения датчиков – типа «треугольника», «квадрата» и т.п.

Единственный, на наш взгляд, вариант повысить точность (предельно, до 0,1-0,3 мм) – это использовать специальные «вероятностные» алгоритмы, учитывающие наличие заведомой ошибки в показаниях каждого датчика.

Мы - единственные, кто реально обеспечивает точность лучше одного миллиметра, и мы знаем, где проходит граница возможного, и как ее достичь. Во время удара о мишень пулька либо деформируется, либо разрушается, и само пятно контакта, где происходят сложные переходные процессы, имеет неопределенно сложную форму и размер до нескольких миллиметров.

На фото ниже показаны стрелками точки первого касания пулькой сенсорного экрана.





Мы провели большую исследовательскую работу, и используем обработку сигналов и частоту захвата сигналов, которая гарантирует дискретность менее 100 наносекунд, что эквивалентно 0.05мм «хода» фронта ударной волны в металле. Мы также индивидуально оцениваем качество сигнала и вклад от каждого датчика, что позволяет получить от "сырых" исходных данных максимум.

В итоге **средняя** ошибка определения начальной точки касания составляет менее одного миллиметра, и даже редкие самые худшие случаи, когда удар проходит по большому пятну неровной формы, с призвуками от осколков и т.п., удается опознать точнее, чем размер самой пульки.