



Оглавление

Предисловие от издательства	11
Предисловие	12
Условные обозначения	13
Глава 1. Смартфон: мобильная мини-лаборатория	15
1. От мобильного телефона до смартфона	15
2. Смартфон: настоящая мобильная мини-лаборатория!	16
3. Смартфоника: сфера применения.....	18
3.1. Что такое смартфоника?.....	18
3.2. Социальные аспекты смартфоники	19
Глава 2. Полезные приложения	21
1. Предупреждение: Каждое приложение имеет свои особенности отображения данных	21
2. Приложение Phyphox (Physical Phone Experiments)	22
3. Приложение PhysicsToolbox Suite	24
4. Приложение Sensor Kinetics	25
5. Какое приложение лучше? Что предпочесть: Phyphox, Physics ToolBox Suite или Sensor Kinetics?	26
5.1. Какие приложения использовались в работе над этой книгой?	26
6. Другие интересные приложения	27
6.1. Приложения для IOS	27
6.2. Приложения для Android	27
6.3. Приложения для Windows Phone	28
6.4. Программы для работы на компьютере.....	28
Глава 3. Датчики смартфона	29
1. Оси смартфона	29
2. Датчики и компоненты смартфона.....	30
2.1 Акселерометр	30
2.2. Линейный акселерометр	35
2.3. Гироскоп	36
2.4. Магнитометр	37

2.5. Датчик давления	38
2.6. Датчик приближения	38
2.7. Датчик освещенности	38
2.8. Экран смартфона	38
2.9. Камера смартфона	39
2.10. GPS и теория относительности	40
2.11. Другие датчики смартфона	40

Глава 4. Смартфон: многофункциональный швейцарский нож науки.....

1. Измеряем угол с помощью смартфона и... вспоминаем тригонометрию	43
1.1. Самое простое (но наименее интересное с научной точки зрения) решение – использовать приложение	44
1.2. Наклон по вертикали	45
1.3. Наклон по горизонтали	47
1.4. Усложним задачу: наклон по горизонтали и вертикали	49
1.5. Наклон в горизонтальной плоскости	50
2. Измеряем расстояние с помощью смартфона и без рулетки	52
2.1. Способ №1: используем приложения.....	52
2.2. Измерить расстояние – значит измерить угол	53
2.3. Измеряем высоту объекта с помощью смартфона	53
2.4. Измеряем расстояние по горизонтали.....	53
2.5. Измеряем расстояние с помощью приложения Google Maps	54
3. Измеряем видимый угловой размер объекта с помощью камеры смартфона	55
3.1. Определение видимого углового размера объекта	55
3.2. Измеряем видимый угловой размер с помощью смартфона	56
4. Измеряем смартфоном скорость, в том числе угловую	57
4.1. Как измерить скорость	57

Глава 5. Эксперименты со смартфоном в области механики

1. Свободное падение смартфона... или Как измерить массу Земли, бросив смартфон	59
1.1. Описание эксперимента.....	60
1.2. Свободное падение: теоретический обзор	61
1.3. Анализ результатов эксперимента свободного падения	63
1.4. Оценка массы Земли с помощью смартфона	63
1.5. Обсуждение	64

2. Скольжение по наклонной опоре, или Как определить коэффициент статического трения.....	66
2.1. Описание эксперимента.....	67
2.2. Краткий теоретический обзор механики наклонной плоскости	67
2.3. Анализ результатов эксперимента скольжения смартфона на наклонной плоскости.....	69
2.4. Измеряем динамический коэффициент трения	70
3. Определяем с помощью смартфона коэффициент динамического трения поверхности стола.....	71
3.1. Описание эксперимента.....	72
3.2. Механика скольжения.....	73
3.3. Анализ результатов эксперимента скольжения смартфона	74
3.4. Усложняем эксперимент.....	75
4. Вращение смартфона и центробежная сила... или Как определить место расположения акселерометра в смартфоне	76
4.1. Описание эксперимента.....	77
4.2. Сложение ускорений и центробежная сила: теоретический обзор ...	78
4.3. Анализ результатов эксперимента с вращающимся смартфоном.....	80
4.4. Определяем местоположение акселерометра в смартфоне	81
5. Маятник, или Как рассчитать радиус Земли на основании колебаний маятника.....	83
5.1. Описание эксперимента.....	84
5.2. Маятник: теоретический обзор	84
5.3. Анализ результатов эксперимента	88
5.4. Обсуждения	90
6. Проверка закона сохранения механической энергии на примере анализа траектории движения	93
6.1. Об эксперименте в деталях	94
6.2. Форма траектории движения мяча: обзор.....	94
6.3. Теперь о сохранении энергии	96
6.4. Анализ результатов эксперимента по бросанию мяча	97
6.5. Усложняем эксперимент.....	97
6.6. Приложение VidAnalysis: краткое руководство по использованию....	98
7. Подвешиваем смартфон на резинку.. или Как сделать весы	99
7.1. Описание эксперимента.....	100
7.2. Колебание пружины: теоретический обзор	100
7.3. Анализ эксперимента с пружиной.....	102
7.4. Усложняем задачу.....	102

Глава 6. Акустические эксперименты со смартфоном	105
1. Хлопаем в ладоши и двумя смартфонами измеряем скорость звука	105
1.1. Описание эксперимента.....	106
1.2. Анализ результатов эксперимента	107
1.3. Усложняем эксперимент.....	107
2. Анализ звука музыкального инструмента	108
2.1. Описание эксперимента.....	108
2.2. Краткие сведения о связи между волнами и спектрами.....	109
2.3. Анализ результатов акустического эксперимента	110
2.4. Усложняем эксперимент.....	112
3. Анализ акустического резонанса гитары	114
3.1. Описание эксперимента.....	115
3.2. Анализ резонанса струны.....	115
3.3. Анализ результатов эксперимента	117
4. Спортивный эксперимент по измерению скорости звука посредством эффекта Доплера.	118
4.1. Описание эксперимента.....	119
4.2. Объяснение эффекта Доплера	120
4.3. Анализ результатов эксперимента по определению доплеровского смещения частоты.....	121
4.4. Усложняем эксперимент.....	121
5. Дуем в бутылку из-под вина Бордо и измеряем скорость звука	122
5.1. Описание эксперимента.....	123
5.2. Суть явления резонанса.....	123
5.3. Анализ результатов эксперимента по определению резонансной частоты бутылки	125
6. Зависимость громкости звука от расстояния до его источника... Нужно ли сидеть в первом ряду, чтобы хорошо слышать?	127
6.1. Описание эксперимента.....	128
6.2. Понятие интенсивности звука	128
6.3. Анализ результатов эксперимента	129
Глава 7. Оптические эксперименты со смартфоном	131
1. Наблюдение инфракрасного излучения с помощью смартфона	131
1.1. Описание эксперимента.....	132
1.2. Датчики камеры смартфона	132
1.3. Анализ эксперимента по визуализации инфракрасного излучения.....	134
1.4. Усложняем эксперимент.....	134

2. Измеряем фокусное расстояние и проверяем геометрическую оптику камеры смартфона	135
2.1. Как работает камера смартфона. Геометрическая оптика: краткий обзор	136
2.2. Описание эксперимента	142
2.3. Анализ результатов эксперимента	143
3. Превращаем смартфон в микроскоп и измеряем толщину волоса	144
3.1. Принцип работы микроскопа	145
3.2. Повышаем увеличение камеры смартфона с помощью идеи объединения двух линз	146
3.3. Капля воды в качестве короткофокусного объектива	147
3.4. Превращаем смартфон в микроскоп	148
3.5. Калибровка микроскопа	148
3.6. Измеряем смартфоном толщину волоса	149
4. Зависимость степени освещенности от расстояния до источника света	151
4.1. Описание эксперимента	152
4.2. Физические характеристики света	153
4.3. Анализ результатов эксперимента	155
4.4. Усложняем эксперимент	155
5. Проверка закона Малюса с помощью смартфона и 3D-очков	157
5.1. Закон Малюса	157
5.2. Описание эксперимента	157
Глава 8. К новым открытиям	161
1. Определяем плотность воздуха и проверяем закон статики жидкостей	161
1.1. Описание эксперимента	162
1.2. Понятие давления и закон статики жидкостей	162
1.3. Анализ результатов эксперимента по зависимости давления от высоты	164
1.4. Усложняем эксперимент	165
2. Измерение поверхностного натяжения и зондирование микроскопических взаимодействий жидкости	167
2.1. Описание эксперимента	168
2.2. Измерение поверхностного натяжения в висящей капле	168
2.3. Анализ результатов	170
3. Наблюдаем клетки и пиксели с помощью смартфона	171
3.1. Рассматриваем пиксели экрана с помощью смартфона	171
3.2. Наблюдаем клетки с помощью смартфона	172

Оглавление

4. Поглощение света и закон Бера–Ламберта	173
4.1. Описание эксперимента.....	174
4.2. Закон Бера–Ламберта	174
4.3. Анализ результатов эксперимента	176
5. Поиск планет за пределами Солнечной системы.....	178
5.1. Эксперимент	178
5.2. Анализ результатов эксперимента	179
Выводы	181
Ссылки	183
Предметный указатель	185

Предисловие от издательства

Отзывы и пожелания

Мы всегда рады отзывам наших читателей. Расскажите нам, что вы думаете об этой книге – что понравилось или, может быть, не понравилось. Отзывы важны для нас, чтобы выпускать книги, которые будут для вас максимально полезны.

Вы можете написать отзыв на нашем сайте www.dmkpress.com, зайдя на страницу книги и оставив комментарий в разделе «Отзывы и рецензии». Также можно послать письмо главному редактору по адресу dmkpress@gmail.com; при этом укажите название книги в теме письма.

Если вы являетесь экспертом в какой-либо области и заинтересованы в написании новой книги, заполните форму на нашем сайте по адресу http://dmkpress.com/authors/publish_book/ или напишите в издательство по адресу dmkpress@gmail.com.

Список опечаток

Хотя мы приняли все возможные меры для того, чтобы обеспечить высокое качество наших текстов, ошибки все равно случаются. Если вы найдете ошибку в одной из наших книг – возможно, ошибку в основном тексте или программном коде, – мы будем очень благодарны, если вы сообщите нам о ней. Сделав это, вы избавите других читателей от недопонимания и поможете нам улучшить последующие издания этой книги.

Если вы найдете какие-либо ошибки в коде, пожалуйста, сообщите о них главному редактору по адресу dmkpress@gmail.com, и мы исправим это в следующих тиражах.

Нарушение авторских прав

Пиратство в интернете по-прежнему остается насущной проблемой. Издательство «ДМК Пресс» очень серьезно относится к вопросам защиты авторских прав и лицензирования. Если вы столкнетесь в интернете с незаконной публикацией какой-либо из наших книг, пожалуйста, пришлите нам ссылку на интернет-ресурс, чтобы мы могли применить санкции.

Ссылку на подозрительные материалы можно прислать по адресу dmkpress@gmail.com.

Мы высоко ценим любую помощь по защите наших авторов, благодаря которой мы можем предоставлять вам качественные материалы.

Предисловие

Эта книга была создана в результате встреч и дискуссий с коллегами – учеными, исследователями и преподавателями Университета Бордо и Лаборатории волн и материи Аквитании (Laboratoire Ondes et Matière d'Aquitaine, LOMA). Важно поблагодарить многих, но я хотел бы особенно отметить помощь П. Барбре, Р. Буагара, Ж-П. Гюйе и Ж. Дежера (P. Barberet, R. Boisgard, J.-P. Guillet и J. Degert). Я также многим обязан общению со студентами, нашим дискуссиям и совместно реализованным проектам. Отдельно хочу поблагодарить первых студентов, которые не побоялись согласиться на эту авантюру и вели этот проект в течение нескольких лет: З. Дэнис (Z. Denis), М. Лаво (M. Lavaud), А. Гролло (A. Grolleau), Н. Дюфур (N. Dufour), Н-А Гой (N.-A. Goy), А. Жиро (A. Girot), С. Тиффон (C. Tiffon), И. Грондан (Y. Grondin). Встречи и дискуссии с коллегами во время занятий в лицее Академии Бордо и других университетах были по-настоящему насыщенными и показали наглядно, что эта область пока находится на начальном этапе своего развития и полученные знания могут внести существенный вклад в науку. Я имею в виду, в частности, наше общение на занятиях в Университете Бордо, наш преподавательский опыт в Университете Париж-Юг с Ф. Буке, Д. Боброфф (F. Bouquet, J. Bobroff), а также живые дискуссии с коллегами из Гренобля (J. Chevrier) и Экс-Марселя, в которых мы участвовали между конференциями. Наше общение всегда было невероятно стимулирующим. Не могу не отметить также инновационную работу об использовании смартфонов в науке, проведенную в Германии Дж. Куном и П. Войтом (J. Kuhn, P. Voigt), так же, как и вклад Ж. Шеврье (J. Chevrier) в Гренобле и П. Жанжако (P. Jeanjacquot) в Лионе. Я надеюсь, что эта книга станет продолжением работы, которую они начали.

Наконец, я бы хотел поблагодарить моих друзей (и особенно Ромена (Romain) за вычитку текста) и мою семью за мотивацию и вдохновение. Спасибо родителям за любознательность и свободу, которую они смогли мне передать, Аделине (Adeline) – за необходимую мне поддержку и наше общение. Анатолий (Anatole) и Нинон (Ninon), огромное вам спасибо за радость и счастье, которые вы излучаете. Желаю вам надолго сохранить свое природное любопытство.

Спасибо!

Посвящается моей семье,
моим родителям

Условные обозначения

В книге используются следующие обозначения:

- ▶ x^s, y^s, z^s обозначают оси смартфона, если другие оси x, y, z уже используются;
- ▶ a_y ускорение, измеряемое акселерометром смартфона по оси y ;
- ▶ \ddot{y} : ускорение по оси y самого смартфона (основной закон механики Ньютона). Не путать с a_y ;
- ▶ лицевая панель: передняя часть смартфона, на которой расположен сенсорный экран;
- ▶ задняя панель: оборотная часть смартфона, на которой расположена основная камера;
- ▶ g : ускорение свободного падения, или гравитация. На Земле $g = 9,81 \text{ м/с}^2$;
- ▶ \vec{i}_x : единичный вектор по оси x .

Смартфон: мобильная мини-лаборатория

1 От мобильного телефона до смартфона

С момента создания первого мобильного телефона (Моторола, 1973 г., см. рис. 1.1) устройство существенно изменилось: размеры уменьшились, а функциональные и энергетические возможности возросли. Был пройден путь от телефона, предназначенного для голосового общения между людьми, до смартфона («интеллектуального» телефона) – по сути, мини-компьютера, способного воспроизводить видео, фотографировать и управлять устройствами на расстоянии. И хотя сейчас смартфоны используются в основном для связи, общения и игр, они содержат в себе много сложных датчиков, которые расширяют функциональные возможности, облегчают использование, считают количество шагов и экономят заряд батареи.



Рис. 1.1. Эволюция мобильных телефонов: а) первый мобильный телефон (Motorola, 1973 г.); б) мобильный телефон Nokia (2000 г.); в) смартфоны 2010–2020 гг.

Это преобразование особенно хорошо заметно на рис. 1.2, на котором показаны датчики смартфонов 2013/2014 годов. Некоторые компании считают смартфон настоящим «спутником жизни», и этот рисунок как раз позволяет оценить количество датчиков, которые могут быть встроены в устройство. Здесь показаны акселерометры, способные распознавать движение, гироскопы, предназначенные для обнаружения и измерения поворота смартфона, датчики магнитного поля (использующие эффект Холла), необходимые для обнаружения крышки экрана, магнитного поля и уточнения местоположения. Имеются также оптические датчики (датчики расстояния и цвета). Датчик расстояния, в частности, нужен, для того чтобы определить, на каком расстоянии смартфон находится от головы пользователя с целью отключения

сенсорного экрана. Помимо этого, есть датчик давления (барометр) и датчик температуры и влажности, не говоря уже о камере (камерах) и микрофоне. И если в 2013 году такие датчики встраивались в единичные модели, то сейчас абсолютное большинство смартфонов (даже в нижнем ценовом сегменте) ими оснащено. Так что уже совершенно не обязательно покупать смартфон последней модели, чтобы иметь доступ ко всем этим функциям.



Рис. 1.2. Различные датчики смартфона

2 СМАРТФОН: НАСТОЯЩАЯ МОБИЛЬНАЯ МИНИ-ЛАБОРАТОРИЯ!

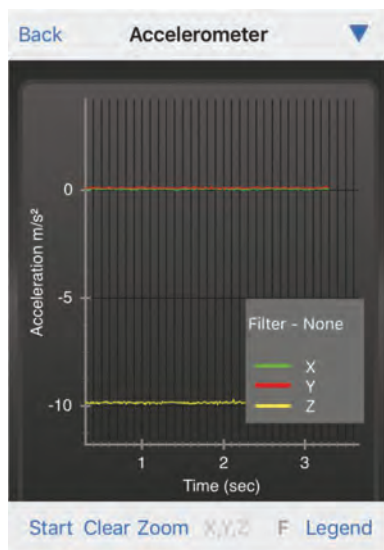
Для исследователя такое техническое устройство – это не просто телефон. Ибо с помощью датчиков давления и температуры можно проводить эксперименты по термодинамике, а с помощью оптических датчиков (датчиков расстояния и камеры) – эксперименты в области оптики и микроскопии. Акселерометры и гироскопы в свою очередь дают возможность ставить опыты в области механики. Датчики магнитного поля и электромагнитных волн, например, позволяют провести опыт по приему и передаче электромагнитных сигналов. Датчиков столько, что их иногда трудно собрать в одной лаборатории (рис. 1.3). Словом, смартфон стал больше похож на настоящую мини-лабораторию, чем просто на средство связи.

Есть много бесплатных приложений, которые дают доступ к этим датчикам и даже позволяют записывать данные в режиме реального времени. Здесь можно упомянуть, например, такие приложения, как *Phyphox*, *Sensor Kinetics* и *Physics Toolbox Suite*. Их можно использовать для записи данных, полученных с каждого датчика, и передавать их на компьютер для дальнейшего анализа. Зачастую можно анализировать собранную информацию прямо на смартфоне.

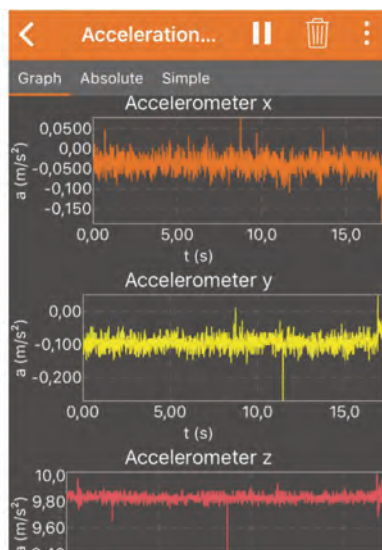
2 Смартфон: настоящая мобильная мини-лаборатория!



Рис. 1.3. Смартфон – это настоящая мини-лаборатория. Показаны примеры датчиков, встроенных в смартфоны



a



b

Рис. 1.4. Пример записи данных акселерометра по осям x, y, z (показано для двух приложений): а) приложение *Sensor Kinetics*; б) приложение *Phyfox*. Обратите внимание на разницу в масштабе между двумя приложениями. Вариант а) показывает три ускорения на одном и том же графике, а вариант б) отображает увеличенный масштаб предварительно записанных ускорений

На рис. 1.4 показаны записи данных акселерометра в двух приложениях. Нужно только нажать кнопку Start или Play и выбрать частоту сбора данных в приложении (до 100 в секунду). Так что становится возможным записывать данные с каждого датчика или даже с нескольких датчиков одновременно, чтобы провести научный эксперимент! Интересно, правда?

А особенно это представляет интерес для ученых, потому что бывает трудно собрать все датчики в одной лаборатории. А теперь все они у вас в кармане, готовы к использованию и проведению настоящих научных экспериментов где угодно и когда угодно!

Таким образом, телефон становится мобильной мини-лабораторией!

3 СМАРТФОНИКА: СФЕРА ПРИМЕНЕНИЯ

3.1. Что такое смартфоника?

Подобно фотонике – области исследований, которая занимается фотонами и светом, – или генетике, которая изучает гены, появился термин «смартфоника»¹. Он описывает использование смартфонов в научных исследованиях.

В этой книге мы расскажем, как использовать датчики смартфонов в научных целях для проведения экспериментов в области механики, акустики и оптики. Некоторые открытия позволят говорить об использовании смартфонов и в других областях: это химия и геофизика, биология и спорт, а также астрофизика.

Смартфон становится незаменимым инструментом исследователя, он все чаще используется в научных лабораториях для проведения измерений и анализа полученных данных. Нередко в исследованиях необходимо дополнять смартфон отдельными устройствами, которые к нему могут подключаться. В книге представлены лишь относительно простые для проведения эксперименты, доступные для большинства обладателей смартфонов. Экспериментальные исследования становятся доступными для всех. Практиковаться можно где угодно! Определить массу Земли на основе эксперимента со свободным падением (острые ощущения гарантированы), измерить угол наклона самолета, вычислить коэффициент трения поверхности стола. А еще можно увидеть пиксели на экране и посчитать скорость звука, дунув в бутылку, проследить подъем пузырьков в шампанском или пиве (в зависимости от бюджета!). Словом, проводить научные эксперименты в увлекательной форме становится очень просто. А с учетом большого количества пользователей (во Франции у трех человек из четырех есть смартфон) заниматься наукой можно повсеместно и коллективно.

Хотя этот аспект не будет рассматриваться в этой книге, это очень важная тема. Впервые научными исследованиями можно заниматься как в на-

¹ MOOC Physique des objets du quotidien (2016), <https://www.fun-mooc.fr/courses/ubordeaux/28003/session01/about>

циональном, так и даже в планетарном масштабе. Особенно с приложением MyShake (оно бесплатное), которое было разработано Калифорнийским университетом. Оно позволяет с большей точностью распознавать землетрясения, а с помощью данных акселерометра оповещать людей. Образовательные, научные и политические задачи очень важны, учитывая огромное количество пользователей смартфонов.

3.2. Социальные аспекты смартфоника

Согласно полученным данным (Центр исследований и мониторинга условий жизни, 2018) во Франции у трех человек из четырех есть смартфон (это 75 %). А если обратить внимание на возрастную группу от 18 до 24 лет, получается, что почти у 98 % людей из этой категории есть смартфон. А с научной точки зрения это означает, что 98 % населения в возрасте от 18 до 24 лет носят в кармане мини-лабораторию и 75 % всего населения Франции могут проводить эксперименты со своим смартфоном. Данные, полученные в мировом масштабе, поражают и мотивируют: в 2018 году смартфон был у 3 млрд человек. Смартфонами пользуются массово и повсеместно еще и потому, что все больше в продаже появляется устройств по низкой цене. Как в случае с выпуском модели Freedom 251 (Индия), который должен выйти на рынок по цене 251 рупий (это примерно 3 евро). С точки зрения развития науки такой «демократичный» доступ к экспериментам с помощью смартфона (мобильной мини-лаборатории) дает перспективу и мотивирует повышать уровень образования и научной деятельности большинство заинтересованных людей.

Не стоит также забывать и о том, что новые технологии, к которым относятся и компьютеры, и солнечные батареи (в целом направление *greentechs* – зеленая технология), аккумуляторы и сами смартфоны сделаны из редких металлов, а процесс их добычи подвергается критике с точки зрения энергетики и экологии. Такие редкие металлы – стратегическое сырье планетарного масштаба. И хотя этот аспект не является темой книги, все же нужно обратить внимание на технологии с уважительным подходом к вопросам экологии и окружающей среды. И тем не менее, несмотря на имеющиеся ограничения, массовое использование смартфона как средства общения создает отличную возможность для обучения и научных экспериментов, где граница между лабораторными инструментами и просто смартфоном постоянно стирается.

Ссылки

1. **МООК. Физика предметов быта (MOOC Physique des objets du quotidien, 2016-2019).**
<https://www.fun-mooc.fr/courses/ubordeaux/28003/session01/about>.
2. **Цифровой барометр Центра исследований и мониторинга условий жизни (CREDOC).**
www.data.gouv.fr/fr/datasets/barometre-du-numerique/.
3. **Мировая статистика использования смартфонов.**
https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_countries_by_smartphone_penetration.
4. **Приложение MyShake.**
<https://play.google.com/store/apps/details?id=edu.berkeley.bsl.myshake&hl=en>.
5. *Дж. Патрон.* Война редких металлов (La guerre des métaux rares, G.Pitron. Édition Les Liens qui Libèrent, 201).
6. *У. Делабр.* Смартфон: мобильная мини-лаборатория для занятий наукой и исследований. Бюллетень 2018. Совет «Физика без границ». (Le smartphone: un mini-laboratoire mobile pour l'enseignement des sciences et la recherche dans le monde U.DELABRE, Bulletin 2018 de la Commission Physique Sans Frontières.)

Смартфон: многофункциональный швейцарский нож науки

В этой главе рассматриваются основные варианты использования датчиков смартфона для измерения углов, расстояния, видимых угловых размеров (важно в астрономии) и, конечно, скорости. Смартфон можно сравнить со знаменитым армейским многофункциональным швейцарским ножом – точным инструментом, проторившим путь в экспериментальную науку.

1 ИЗМЕРЯЕМ УГОЛ С ПОМОЩЬЮ СМАРТФОНА И... ВСПОМИНАЕМ ТРИГОНОМЕТРИЮ

В ходе эксперимента часто возникает необходимость измерить угол (например, угол наклонной опоры, угол смартфона по отношению к свету и т. д.). В этой главе мы узнаем, как с помощью смартфона измерить угол. Задача не сложная, ведь есть много простых способов это сделать. Можно использовать транспортир или геометрическое правило соотношения сторон треугольника, чтобы определить тангенс угла с известными тригонометрическими соотношениями (наверное, это самый простой способ в большинстве случаев).

И все-таки во время эксперимента будет интересно измерить непосредственно угол наклона самого измерительного прибора – т. е. смартфона – относительно какого-то направления, не используя другое средство измерения. Рассмотрим три конфигурации, приведенные на рис. 4.1 ниже: наклон по вертикали (вариант а), наклон по горизонтали (вариант б) и наклон в выбранном направлении относительно горизонтали (вариант с). Обратите внимание на направление ускорения свободного падения (g) на этих рисунках, оно указывает на вертикаль. Умение измерить угол требуется не только в механике, но еще и в оптике, например при изучении закона Малюса для поляризованного света. Эта глава поможет освоить датчики смартфона и понять, как они работают.

Для вариантов а) и б) рис. 4.1 самый предпочтительный датчик для определения угла наклона – это акселерометр смартфона. А в случае с) нужно использовать датчик магнитного поля.

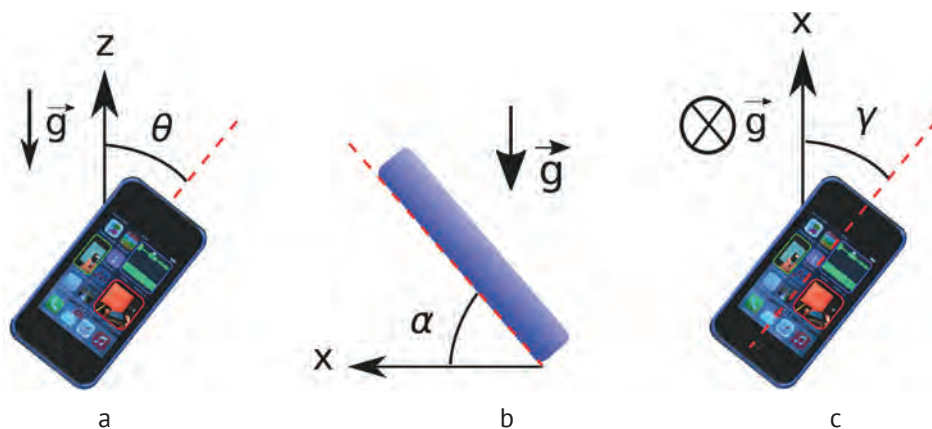


Рис. 4.1. а) Наклон по вертикали, б) наклон по горизонтали, с) наклон в выбранном направлении относительно горизонтали

1.1. Самое простое (но наименее интересное с научной точки зрения) решение – использовать приложение

Конечно, самое простое и очевидное решение – это просто использовать одно из доступных приложений. Например, функция *Inclination* (Наклон) приложения *Phyphox* позволяет измерять углы по горизонтали (*Inclination* на рис. 4.2), а функция *Rotation* (Вращение) – по вертикали (*Rotation* на рис. 4.2). Есть, конечно, и другие приложения, с помощью которых можно измерить угол.

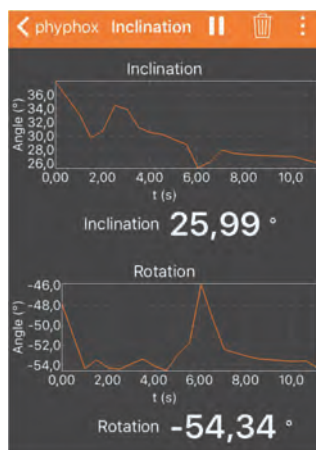


Рис. 4.2. Функция *Inclination* приложения *Phyphox* используется для измерения углов. Термин *inclination* соответствует наклону по горизонтали, а *rotation* – наклону по вертикали

Чтобы использовать датчики в будущих научных экспериментах, важно понять, как работают эти приложения, они очень удобны для измерения углов.

1.2. Наклон по вертикали

1.2.1. Смартфон в состоянии покоя в вертикальном положении

Прежде всего нас интересует смартфон в вертикальном положении, который находится в состоянии покоя, как показано на рис. 3.4 в предыдущей главе. Учитывая материал об акселерометрах в главе 3, когда смартфон находится в вертикальном положении, измеренные ускорения будут следующими:

$$a_x = 0; a_y = -g; a_z = 0.$$

Это примерно то же, что мы получили на рис. 3.4 (см. главу 3).

Предупреждение. Напомним, что в некоторых приложениях отображается $a_y = +g$ а не $a_y = -g$ (в состоянии покоя) из-за разного направления выбранной шкалы измерения ускорения свободного падения. Дальнейшие рассуждения будут справедливы в случае смены знака.

С другой стороны, поскольку смартфон неподвижен и находится в состоянии покоя, теоретические значения ускорения смартфона по осям координат будут такими:

$$\ddot{x} = 0; \ddot{y} = 0; \ddot{z} = 0$$

Во избежание путаницы напомним ещё раз: a_y – это ускорение по оси y , измеренное акселератором смартфона, а \ddot{y} – это ускорение самого смартфона по оси y . Акселерометр измеряет эффективные ускорения с учетом гравитации. Таким образом, в состоянии покоя $a_y = -g$, тогда как $\ddot{y} = 0$ (в м/с^2).

На рис. 3.4 (см. главу 3) видно, что ускорения, измеряемые по осям x и z , не строго равны нулю. Это может быть обусловлено некорректной калибровкой, погрешностями измерения и т. д. Чтобы получить более точные результаты измерений, нужно учитывать полученные значения (включая погрешность), когда смартфон находится в вертикальном положении (такая же ситуация возникнет в горизонтальном положении и других конфигурациях). Таким образом, отметим, что (при $g = 9,81 \text{ м/с}^2$):

$$\begin{aligned} a_x &= a_x^{\text{смещ}}, \\ a_y &= -g + a_y^{\text{смещ}}, \\ a_z &= a_z^{\text{смещ}}. \end{aligned}$$

где $a_x^{\text{смещ}}, a_y^{\text{смещ}}, a_z^{\text{смещ}}$ – значения погрешности в состоянии покоя по соответствующим осям координат.

1.2.2. Измерение вертикального угла

Когда смартфон наклонен под углом θ к вертикали (рис. 4.3b), то в проекции по осям координат мы имеем:

$$\begin{aligned} a_x &= -g \sin \theta, \\ a_y &= -g \cos \theta, \\ a_z &= 0. \end{aligned}$$

Угол θ образован вертикалью и осью y смартфона (рис. 4.3а, б). Для рисунка 4.3б, таким образом, мы имеем $\theta < 0$ (следовательно, $\sin \theta < 0$ и $\cos \theta > 0$). Для простоты мы сначала пренебрегли значениями смещений $a_x^{\text{смещ}}$ и т. д. Таким образом, мы можем узнать угол наклона смартфона, просто измеряя ускорение смартфона.

Угол наклона смартфона относительно вертикали определяется как:

$$\operatorname{tg} \Theta = \frac{a_x}{a_y} \Rightarrow \Theta = \operatorname{arctg} \frac{a_x}{a_y}. \quad (4.1)$$

Для большей точности расчетов надо вычесть значение погрешности $a_x^{\text{смещ}}$, $a_y^{\text{смещ}}$, $a_z^{\text{смещ}}$.

Тогда получаем:

$$\operatorname{tg} \Theta = \frac{a_x - a_x^{\text{смещ}}}{a_y - a_y^{\text{смещ}}} \Rightarrow \Theta = \operatorname{arctg} \frac{a_x - a_x^{\text{смещ}}}{a_y - a_y^{\text{смещ}}}. \quad (4.2)$$

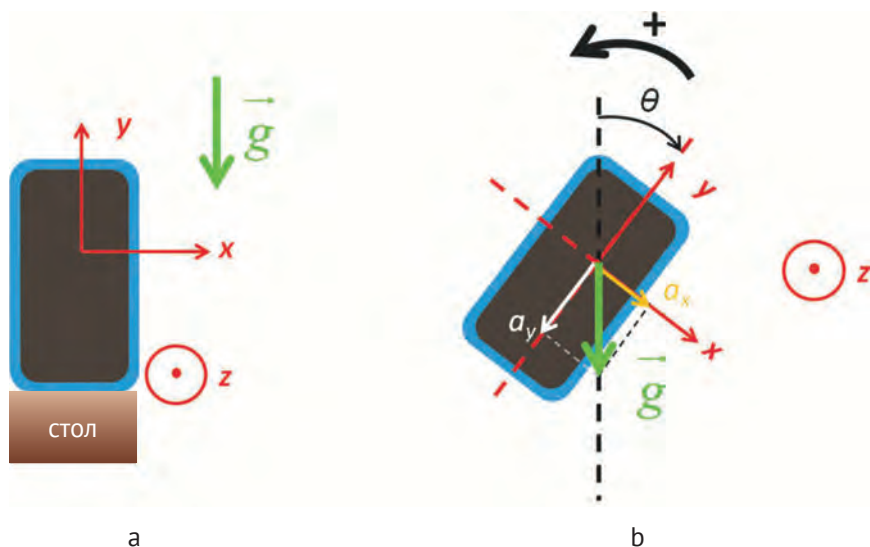


Рис. 4.3. а) Смартфон в состоянии покоя в вертикальном положении. Вертикаль показана направлением ускорения свободного падения g , б) смартфон отклонен от вертикали на угол θ . Знак + указывает на положительное тригонометрическое направление

Например, мы вручную наклонили смартфон по отношению к вертикали и сравниваем значения, полученные в результате этого расчета, со значениями, полученными с помощью приложения для измерения угла (например, функция *Angle meter* (измеритель угла) или функция *Inclinaison* приложения *Rhyphox*). Вот результаты:

- ▶ в состоянии покоя по вертикали (в м/с^2): $a_x = -0,08 = a_x^{\text{смещ}}$; $a_y = -9,8$ soit $a_y^{\text{смещ}} = 0,01$ и $a_z = -0,04 = a_z^{\text{смещ}}$;
- ▶ при наклоне смартфона под углом -37° (в результате измерения транспортиром) (в м/с^2): $a_x = 5,80$, $a_y = 7,93$ и $a_z = -0,21$.

1 Измеряем угол с помощью смартфона и... вспоминаем тригонометрию

Отметим, что $a_z \approx 0$ как в состоянии покоя, так и при наклоне смартфона. Это свидетельствует о том, что смартфон остается в вертикальной плоскости. Совершая вычисления в уравнении 4.1 без учета погрешности, получаем значения угла $\theta = -36,3^\circ$. А из уравнения 4.2 с учетом смещения получаем $\theta = -36,7^\circ$.

1.3. Наклон по горизонтали

1.3.1. Смартфон в состоянии покоя в горизонтальном положении

Рассмотрим ситуацию, когда смартфон находится в горизонтальном положении, например лежит на столе (рис. 3.3, глава 3). Подход здесь такой же, как и для наклона по вертикали. Когда смартфон находится в горизонтальном положении, мы видим, что измеренные ускорения по осям координат составляют:

$$a_x = 0; a_y = 0; a_z = -g.$$

С другой стороны, поскольку смартфон неподвижен и находится в состоянии покоя, то теоретические значения ускорения смартфона как объекта по осям координат такие:

$$\dot{x} = 0; \dot{y} = 0; \dot{z} = 0.$$

Еще раз отметим, что ускорение, которое измеряется по оси z с помощью акселерометра смартфона, обозначено как a_z , тогда как ускорение смартфона как объекта обозначается как \ddot{z} . Также напомним, что акселерометр измеряет эффективное ускорение с учетом силы тяжести. Таким образом, в состоянии покоя $a_z = -g$ тогда как $\ddot{z} = 0$.

Как было показано ранее на рис. 3.3 (глава 3), ускорения, измеренные по осям x , y , z , не равны строго нулю. В реальности существуют небольшие погрешности. Поэтому, учитывая их, получаем:

$$a_x = a_x^{\text{смещ}}; \quad (4.3)$$

$$a_y = a_y^{\text{смещ}}; \quad (4.4)$$

$$a_z = -g + a_z^{\text{смещ}}. \quad (4.5)$$

1.3.2. Измерение горизонтального угла (1)

Когда смартфон наклонен под углом α по отношению к горизонтали, то по проекциям осей координат мы имеем:

$$a_x = 0; \quad (4.6)$$

$$a_y = g \sin \alpha; \quad (4.7)$$

$$a_z = -g \cos \alpha. \quad (4.8)$$

Угол α здесь представляет собой угол между осью x на рис. 4.4а и осью y на рисунке 4.4б. Следовательно, для этого рисунка значение угла α отрицательно с учетом (показанного черной стрелкой) положительного тригонометрического направления (поэтому $\sin \alpha < 0$ и $\cos \alpha > 0$). Сначала мы пренебрегаем значениями смещений $a_x^{\text{смещ}}$ и т. д. Тогда мы можем узнать угол наклона смартфона,

просто измерив ускорение смартфона. Итак, угол наклона смартфона определяется как:

$$\operatorname{tg} \alpha = -\frac{a_y}{a_z} \Rightarrow \alpha = -\operatorname{arctg} \frac{a_y}{a_z}. \quad (4.9)$$

Для повышения точности расчетов мы должны вычесть значения смещений: $a_x^{\text{смещ}}$, $a_y^{\text{смещ}}$, $a_z^{\text{смещ}}$. В результате получаем:

$$\operatorname{tg} \alpha = -\frac{a_y - a_y^{\text{смещ}}}{a_x - a_x^{\text{смещ}}} \Rightarrow \alpha = -\operatorname{arctg} \frac{a_y - a_y^{\text{смещ}}}{a_x - a_x^{\text{смещ}}}. \quad 4.10$$

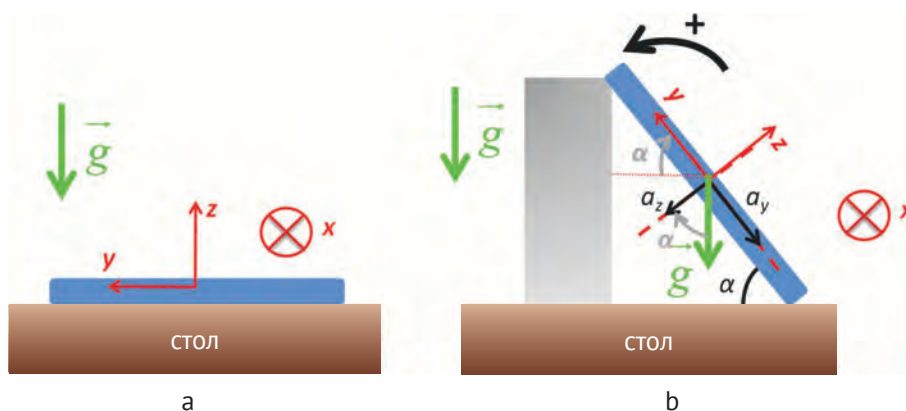


Рис. 4.4. а) Смартфон в состоянии покоя в горизонтальном положении, б) смартфон наклонен под углом α к горизонтали

Например, мы наклонили смартфон с помощью книги¹ и сравниваем значения, полученные с помощью этого расчета, со значениями приложения, измеряющего угол (например, функция *Angle meter* или функция *Inclinaison* приложения *Phyphox*). Мы получили следующие результаты:

- ▶ смартфон в горизонтальном положении и в состоянии покоя. Единица измерения – м/с². Использовалось приложение *Sensor Kinetics*:
- ▶ $a_x = -0,03 = a_x^{\text{смещ}}$, $a_y = 0,02 = a_y^{\text{смещ}}$, $a_x = -9,79$ т. е. $a_z^{\text{смещ}} = 0,02$;
- ▶ когда смартфон наклонен под углом $-25,6^\circ$, мы имеем (в м/с²): $a_x = -0,03$, $a_y = -4,25$, $a_z = -8,85$.

Обратите внимание на тот факт, что ускорение по оси x $a_x \approx 0$ и когда смартфон находится в горизонтальном положении, и в наклоне. Это свидетельствует о том, что во время измерений он оставался неподвижным.

Вычисление по формуле 4.9 без учета погрешности дает нам значение угла $\alpha = -25,6^\circ$, а по формуле 4.10 с учетом погрешности получаем $\alpha = -25,7^\circ$. Вычислен-

¹ Landau-Lifschitz, *Mécanique des fluides*, un classique en physique (Ландау-Лифшиц, механика жидкостей, классическая физика).

1 Измеряем угол с помощью смартфона и... вспоминаем тригонометрию

ные нами значения полностью согласуются со значениями, которые были получены в приложении. Это говорит о том, что погрешности по осям x и y ($a_x^{смещ}$, $a_y^{смещ}$) несущественны.

1.3.3. Измерение горизонтального угла (2)

Есть и равнозначный вариант, когда вместо наклона по осям смартфона y и z наклон выполнен по осям x и z , как показано на рис. 4.5. Это соответствует варианту наклона смартфона как на рис. 4.5b.

В этом случае мы находим аналогичные выражения для угла наклон α . Из рис. 4.5a мы имеем ($\alpha < 0$):

$$a_x = -g \sin \alpha; \quad (4.11)$$

$$a_y = 0; \quad (4.12)$$

$$a_z = -g \cos \alpha. \quad (4.13)$$

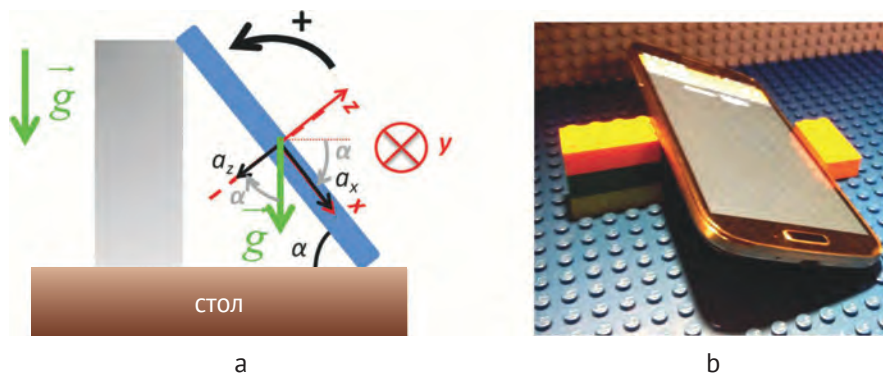


Рис. 4.5. а) Смартфон наклонен под углом α к горизонтали. Обратите внимание на различия по осям в сравнении с рис. 4.4, б) пример наклона смартфона относительно горизонтали (здесь $\alpha < 0$).

Мы находим, что угол α определяется выражением (следуя тем же рассуждениям, что и раньше):

$$\alpha = \arctg \left(\frac{a_x - a_x^{смещ}}{a_z - a_z^{смещ}} \right).$$

1.4. Усложним задачу: наклон по горизонтали и вертикали

Теперь рассмотрим общий случай – наклон и по горизонтали, и по вертикали. Такая конфигурация соответствует сочетанию двух примеров, которые были рассмотрены ранее.

Получается, что наклон по вертикали будет определяться соотношением ускорений по осям x и y , а наклон по горизонтали будет определяться соотношением ускорений по осям y и z .

Тогда получается:

$$\theta \text{ относительно вертикали } \Theta_{\text{ext}} = \text{arctg} \left(\frac{a_x - a_x^{\text{смест}}}{a_y - a_y^{\text{смест}}} \right); \quad (4,14)$$

$$\alpha \text{ относительно горизонтали } \Theta_{\text{ext}} = \text{arctg} \left(\frac{a_x - a_x^{\text{смест}}}{a_y - a_y^{\text{смест}}} \right); \quad (4,15).$$

Таким образом, из полученных измерений:

$$a_x = 5,27;$$

$$a_y = -7,23;$$

$$a_z = -3,24$$

мы можем сделать вывод, что смартфон наклонен $\theta = -36^\circ$ по отношению к вертикали и угол $\alpha = -65,9^\circ$ по отношению к горизонтали, что может быть подтверждено, например, функцией *Inclinaison* приложения *Phyphox*.

1.5. Наклон в горизонтальной плоскости

Измерения, которые были приведены выше, не могут помочь нам ориентироваться по горизонтали, как это показано на рис. 4.1с. А теперь давайте предположим, что нужно вычислить угол между двумя объектами, которые мы видим на горизонте. Для этого мы можем направить смартфон по горизонтальной плоскости на эти объекты, что будет соответствовать случаям а и б рис. 4.6. Принцип измерения углов θ_1 и θ_2 такой же, как и раньше, за исключением того, что вместо направления силы тяжести, которое соответствует вертикальному направлению, здесь в качестве опорного направления будет выступать магнитное поле Земли. Величина магнитного поля Земли зависит от места расположения наблюдателя. Во Франции горизонтальная компонента магнитного поля Земли составляет $B_H \approx 20$ мкТл ($\approx 20 \times 10^{-6}$ Тл).

Чтобы вычислить угол между двумя направлениями по горизонтали (рис. 4.6), прежде всего нужно зарегистрировать магнитное поле в этих направлениях, сохраняя при этом горизонтальное положение самого смартфона (и, если необходимо, проверяя по данным акселерометра выполнение этого условия $a_z \approx -g$). Кроме этого, нужно определить исходное положение, в котором магнитное поле имеет максимальное значение по одной из осей смартфона. В нашем случае была выбрана ось y , как и на рис. 4.6b (хотя с тем же успехом это может быть и ось x).

В таких условиях конфигурация рис. 4.6с является эталонной, где найдено максимальное значение магнитного поля, равное B_{max} . Чтобы найти это положение, мы просто плавно поворачивали смартфон, пока не достигли максимального значения магнитного поля по оси y (рис. 4.7а). Поэтому для исходного положения смартфона мы получаем: $B_y^{\text{опор}} = B_{\text{max}}$. Повернув смартфон в направление θ_1 , по проекции на ось y мы получим:

$$B_y^1 = B_{\text{max}} \cos(\Theta_1).$$

1 Измеряем угол с помощью смартфона и... вспоминаем тригонометрию

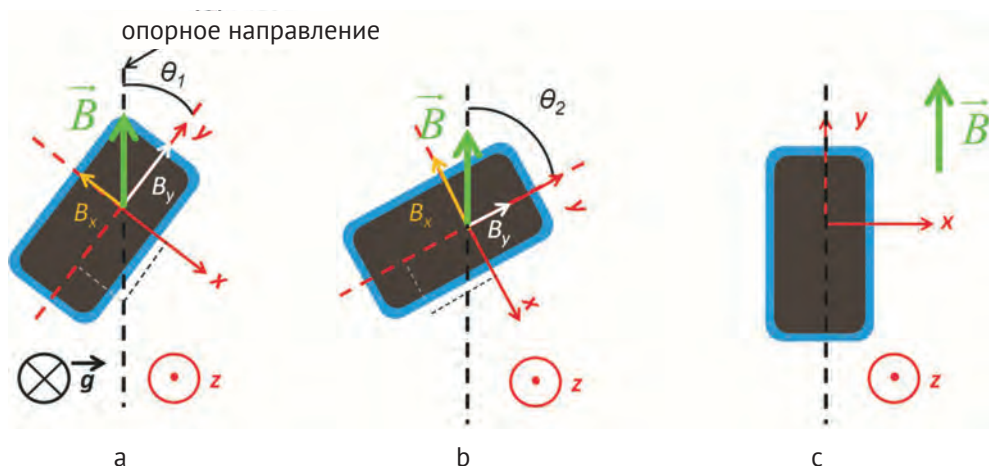


Рис. 4.6. а) Смартфон наклонен под углом θ_1 к горизонтальному опорному направлению, б) смартфон наклонен под углом θ_2 к горизонтальному опорному направлению, отмеченному пунктиром, в) смартфон в горизонтальном положении, выровнен по отношению к опорному направлению

Отсюда можно вычислить $\theta_1 = \arccos(B_y^1/B_y^{\text{опор}})$. Такие же вычисления можно произвести для направления θ_2 , а именно $B_y^2 = B_{\text{max}} \cos(\theta_2)$ и, следовательно, $\theta_2 = \arccos(B_y^2/B_y^{\text{опор}})$. А получив эти результаты, можно вычислить угол между двумя направлениями θ_1 и θ_2 :

$$\theta_2 - \theta_1 = \arccos\left(\frac{B_y^2}{B_y^{\text{опор}}}\right) - \arccos\left(\frac{B_y^1}{B_y^{\text{опор}}}\right).$$

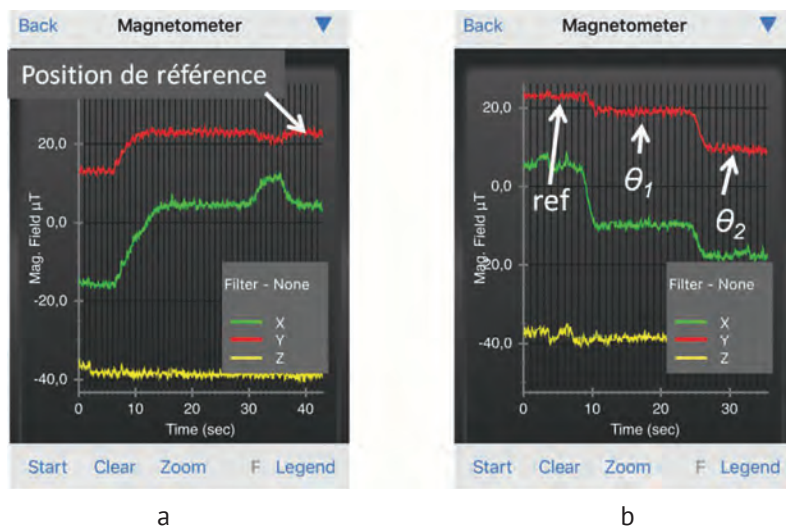


Рис. 4.7. а) Поиск исходного положения смартфона по максимальному значению поля по оси y, б) поворот смартфона из исходного положения в направление θ_1 и затем в направление θ_2

Из рис. 4.7б становится понятно, что мы поворачивали смартфон из его исходного положения в направлении θ_2 через промежуточное направление θ_1 . Мы получили следующие измерения:

$$B_y^{\text{опор}} = 22,52 \text{ мкТл}; B_y^1 = 19,09 \text{ мкТл}; B_y^2 = 9,22 \text{ мкТл},$$

и на их основе мы вычислили искомый угол:

$$\theta_2 - \theta_1 = 34^\circ.$$

Вот так можно определить угол между двумя горизонтальными направлениями, используя магнитное поле Земли.

2 ИЗМЕРЯЕМ РАССТОЯНИЕ С ПОМОЩЬЮ СМАРТФОНА И БЕЗ РУЛЕТКИ

В ходе эксперимента нередко нужно узнать расстояние, рассчитать скорость, посчитать высоту здания. Если при небольших расстояниях лучше решение – это использовать линейку или рулетку, то для больших расстояний это уже не самый удобный способ. Есть несколько альтернативных методов, которые дополняют традиционные... будем вспоминать геометрию!

2.1. Способ №1: используем приложения

Есть много приложений, с помощью которых можно измерять расстояния. Например, *Easy Measure*, *Smart Measure* и *Air Measure*. Эти приложения сами по себе очень удобны, и далее мы рассмотрим геометрические методы, на основе которых они работают. Это поможет лучше разобраться в работе датчиков смартфона.

Можно также использовать функцию *Sonar* приложения *Phyphox*. Благодаря обмену определенными сигналами и такому явлению, как эхо, эта функция может, например, определить расстояние до стены.

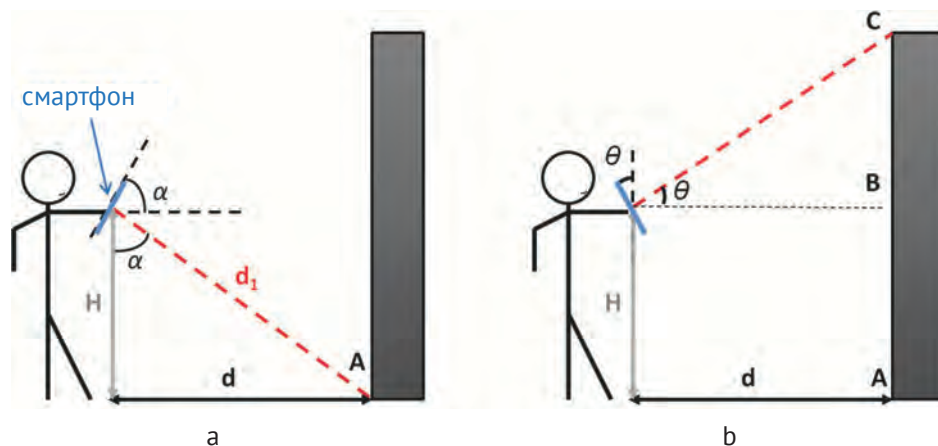


Рис. 4.8. а) Измерение расстояния d, б) измерение высоты AC

2.2. Измерить расстояние – значит измерить угол

Многие приложения определяют расстояние на основе измерения угла. Действительно, если посмотреть на рис. 4.8а, то становится понятно: чтобы определить расстояние d , необходимо измерить высоту H и угол α .

Рассмотрим эту задачу на примере здания. Будем вычислять расстояние от наблюдателя до здания. Сфотографируем линию основания здания (объекта A), удерживая смартфон на уровне подбородка. Это нужно для того, чтобы снимки делать с одинаковой высоты H . Если вы знаете свой рост, то достаточно из его значения вычесть всего 25 см, чтобы определить высоту подбородка относительно земли (а если смартфон держать перед глазами, то вычесть нужно только 10 см). После этого наклоните смартфон так, чтобы основание объекта (точка A) располагалась в центре снимка. С помощью приложения для измерения угла или с помощью записи ускорений можно вычислить угол наклона α смартфона по горизонтали, как мы уже делали раньше. Тогда расстояние d определяется следующей формулой:

$$d = H \cdot \operatorname{tg}(\alpha).$$

2.3. Измеряем высоту объекта с помощью смартфона

Пусть нам нужно измерить высоту здания (рис. 4.8b). Способ измерения высоты AC тот же, что мы уже использовали в предыдущем примере. Сначала определяем расстояние d , сфотографировав нижнюю часть здания (точка A). Затем нужно наклонить смартфон так, чтобы верхняя часть здания – точка C – находилась в центре фотографии, и сделать фотографию. Записывая ускорения или напрямую измеряя угол θ (дополнительный угол горизонтального наклона), мы получаем $\operatorname{tg}(\theta) = BC / d$. После этого вычисляем полную высоту здания:

$$AC = H + d \cdot \operatorname{tg}(\theta).$$

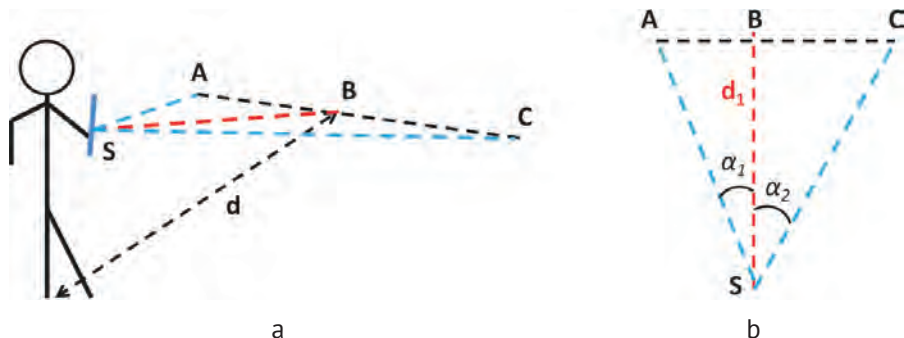


Рис. 4.9. Измерение расстояния AC по горизонтали: а) вид сбоку, б) вид сверху

2.4. Измеряем расстояние по горизонтали

Измерение расстояния по горизонтали сводится к измерению горизонтальных углов. Метод показан на рис. 4.9. Как и раньше, определив расстояние d и зна-

чения углов наклона с помощью датчика магнитного поля, мы можем измерить углы α_1 и α_2 (рис. 4.9b). Тогда искомое расстояние будет определяться следующей формулой:

$$AC = AB + BC = d_1(\operatorname{tg}\alpha_1 + \operatorname{tg}\alpha_2),$$

где $d_1 = d / \sin(\alpha) = H / \cos(\alpha)$ (рис. 4.8).

Мы рассмотрели геометрические методы, основанные на измерениях углов для вычисления расстояния и высоты. А теперь перейдем к последнему способу измерения достаточно больших расстояний

2.5. Измеряем расстояние с помощью приложения Google Maps

Этот метод полезен, когда расстояния относительно большие. Карты Google позволяют просто измерять расстояния маршрута с помощью функции измерения расстояния. Надо выполнить всего несколько действий и измерить расстояние прямо на интересующей нас карте.



Рис. 4.10. а) Расстояние, которое было измерено с помощью Google.Maps, б) расстояние было измерено по спутниковой карте

В заключительной части этой главы мы расскажем, как измерять скорость – линейную или угловую, что важно для проведения многих экспериментов.