

УДК 681.518.2

ВИКОРИСТАННЯ Wi-Fi ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ РОЗРОБКИ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ ПРОСТОРОВОГО ПОЛОЖЕННЯ ПРОКОЛЮЮЧОЇ ГОЛОВКИ ПРИ БЕЗГРАНШЕЙНОЇ ПРОКЛАДКИ КОМУНІКАЦІЙ

Д.т.н. В.Д. Сахацький, Є.О. Чепусенко, Харківський національний автомобільно-дорожній університет

За допомогою використання Wi-Fi технологій запропоновано спосіб здешевлення вимірювальної системи визначення місця положення та напрямку руху головки, яка здійснює прокол ґрунту. Розроблено макет вимірювальної системи та експериментально підтверджена його ефективність.

С помощью Wi-Fi технологий предложен способ удешевления измерительной системы определения места расположения и направления движения головки для прокола грунта. Разработан макет измерительной системы и экспериментально подтверждена его эффективность.

Using Wi-Fi technology, a method has been proposed for reducing the cost of a measuring system for determining the location and direction of movement of a head for puncture of the ground. A model of the measuring system has been developed and its effectiveness has been experimentally confirmed.

Ключові слова: MPU-6050, ESP8266, ESP-07S, акселерометр, гіроскоп, MEMS, Wi-Fi, бурова головка, горизонтальний прокол, безтраншейна прокладка, комунікації.

Постановка проблеми

Останнім часом в Україні та інших країнах світу впроваджують сучасні технології безтраншейної прокладки комунікацій які забезпечують горизонтальний прокол ґрунту та не потребують руйнування дорожнього покриття. Для цієї мети використовують спеціальні механізми [1].

Прокол ґрунту здійснюється за допомогою проколюючої головки, пробійника або бури. Для визначення координат головки та її відхилення від заданої траси використовують телеметричну систему, яка складається з передавального та приймального пристроїв. Передавальний пристрій поміщають у проколюючу головку. Для електромагнітного випромінювання у головці прорізають щілину. Приймач розташовується на поверхні та приймає електромагнітне випромінювання від передавача.

Як правило, більшість таких телеметричних систем працюють у низькочастотному діапазоні 1,5 кГц – 30 кГц. Вартість вимірювальних систем зарубіжних виробників оцінюється десятками тисяч доларів.

Тому постало питання розробки більш простих і дешевих систем вимірювання координат проколюючої головки, яку можна використовувати на вітчизняних бурових установках.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В роботі [2] запропоновано спосіб та пристрій визначення координат пробійника у ґрунті. Суть способу полягає у визначенні сигналу випромінювача електромагнітного поля, розташованого на пробійнику або поруч з ним, за допомогою двох антен, приймального пристрою і індикатора, розташованих на поверхні землі. В якості сигналу випромінювача використовують обертове магнітне поле, причому магнітне поле обертають так, щоб площина обертання вектору магнітного моменту випромінювача була перпендикулярною осі пробійника. Приймають сигнали в ближній зоні, де переважає реактивна потужність поля. За допомогою двох антен, закріплених на загальній базі на відстані d так, щоб збіглися площини нулів їх діаграм спрямованості, визначають площину обертання вектору магнітного моменту випромінювача шляхом поєднання з нею площини нулів діаграм спрямованості антен так, щоб рівні сигналів в антенах дорівнювали нулю. При цьому кут нахилу площини нулів діаграм спрямованості щодо вертикалі дорівнює куту тангажа пробійника. Потім визначають параметри вектору градієнта поля і за ними визначають напрямок на випромінювач і відстань до нього. Для цього повертають антени до отримання максимального рівня наведеного сигналу, орієнтують базу так, щоб відносини рівнів сигналів в антенах було мінімальним. При цьому напрямок бази збігається з напрямком на випромінювач, і обчислюють відстань до випромінювача L по формулі

$$L = \frac{\sqrt[3]{d}}{1 - \sqrt[3]{d}} \cdot d, \quad (1)$$

де d – відстань між двома антенами, м.

Суть другого способу полягає в тому, що за допомогою жорстко пов'язаного з пробійником або буром випромінювача збуджують змінне низькочастотне магнітне поле так, щоб силові лінії магнітного поля проходили симетрично і дотичне до площини, що проходить через випромінювач і перпендикулярній осі пробійника або бури. При цьому щоб були силові лінії, що лежать у вертикальній площині, що збігається за напрямком з віссю пробійника або бури [3]. Визначають положення в просторі цих площин за допомогою спрямованих властивостей антен, розташованих на поверхні ґрунту. Знаходять лінію перетину вертикальній

площині з поверхнею ґрунту і по її напрямку визначають курс, а за кутом нахилу до поверхні ґрунту площині, перпендикулярній до осі пробійника або бура, визначають тангаж. Низькочастотне магнітне поле випромінювача збуджують за допомогою двох ідентичних співвісних, включених протифазно, котушок індуктивності, рознесених уздовж осі пробійника та формують сумарно-різницеву діаграму спрямованості антен. Переміщують антени на поверхні і визначають положення, в яких різницевий сигнал дорівнює нулю. По орієнтації антен в цих положеннях визначають розташування площини перпендикулярної осі пробійника або бура і вертикальній площині і, таким чином, визначають курс і тангаж пробійника.

В роботі [4] описано спосіб, в якому за допомогою розташованого на пневмопробійнику або поруч з ним генератора хвильового випромінювання збуджують електромагнітні коливання і визначають азимут руху пневмопробійника за максимальною величиною хвильового випромінювання, при цьому в якості генератора хвильового випромінювання використовують іскровий розряд, причому іскровий розряд посиляють окремими імпульсами, які формують з частотою менше 50 Гц або більше 65 Гц.

Ці операції дозволяють ідентифікувати сигнал по відношенню до інших сигналів, що сприяє підвищенню надійності виявлення.

Імпульси формують з частотою рівною частоті удару пневмопробійника за допомогою електричної машини високої напруги, для обертання валу якої використовують стиснене повітря.

Електромагнітні хвилі, що виникають при проходженні електричної іскри між контактами розрядника, уловлюються спрямованими антенами, з'єднаними з аналізаторами сигналів. Частота іскрових розрядів залежить від числа обертів турбіни. Маючи в своєму розпорядженні на поверхні ґрунту дві антени з аналізаторами сигналів, можна визначити азимутальну площину і напрям руху пневмопробійника.

Актуальність роботи

Існуючі методи визначення координат головки механізму, за допомогою котрої здійснюється прокол ґрунту, є скрутними в своїй реалізації, потребують додаткових розрахунків, мають великі габарити, енерговитратні та дорого коштують. Оскільки такі вимірювальні системи працюють у низькочастотному діапазоні, то якість їх роботи знижується під впливом індустриальних перешкод.

Тому створення вимірювальних систем, які зменшують ці недоліки є актуальною задачею.

Мета і задачі роботи

В задачу роботи входить вивчення можливості створення малогабаритної НВЧ телеметричної системи контролю траєкторії руху проколюючої головки з ціллю зменшення її вартості, енергоспоживання, підвищення завадостійкості в умовах дії індустриальних перешкод.

Технологія побудови вимірювальної системи

На сьогоднішній день для обміну інформацією між її джерелом и приймачем використовують Wi-Fi технології.

Технологія Wi-Fi – вид локальної обчислювальної мережі, що використовує для зв'язку і передачі даних між вузлами високочастотної радіохвилі [5, 3]. Це гнучка система передачі даних, яка застосовується для створення бездротових локальних мереж і організації високошвидкісних бездротових підключень. Залежно від конкретного стандарту мережі Wi-Fi системи працюють на частотах 2,4 ГГц або 5 ГГц і забезпечують швидкість передачі даних від 2 Мбіт/с.

Область охоплення систем Wi-Fi з найпростішими антенами досягає 300 метрів, маючи антени з великим посиленням – до 7 км в залежності від кількості та виду перешкод. Wi-Fi системи засновані на стандарті IEEE 802.11. Це набір стандартів зв'язку для комунікації через бездротову локальну мережу у зоні частотних діапазонів. Стандарт 802.11 визначає два типи обладнання – клієнт, який зазвичай є комп'ютер, укомплектований бездротовою мережевою інтерфейсною картою і точку доступу, яка виконує роль моста між бездротовими і дротовими мережами. Точка доступу зазвичай містить в собі приймач, інтерфейс провідної мережі, а також програмне забезпечення, що займається обробкою даних [5].

Стандарт 802.11 використовує метод прямої послідовності і метод частотних стрибків. Основна ідея технології розширення спектру прямої послідовності полягає в тому, щоб від вузькосмугового спектру сигналу, що виникає при звичайному потенційному кодуванні, перейти до широкосмугового спектру. Саме це дозволяє значно підвищити завадостійкість переданих даних.

При потенційному кодуванні інформаційні біти 0 і 1 передаються прямокутними імпульсами напруги. Сигнал можна представити у вигляді дискретного або безперервного набору гармонік синусоїдальних сигналів з певним чином підібраними ваговими коефіцієнтами і частотами. Інформаційний біт, що представляється прямокутним імпульсом, розбивається на послідовність більш дрібних імпульсів-чипів.

На фізичному рівні визначені два широкосмугових радіочастотних методи передачі та один – в інфрачервоному діапазоні. Радіочастотні методи працюють на частоті 2,4 ГГц і зазвичай використовують смугу 83 МГц від 2,400 ГГц до 2,483 ГГц. Технології широкосмугового сигналу, що використовуються в радіочастотних методах, збільшують надійність, пропускну здатність, дозволяють багатьом непов'язаним один з одним пристроїв розділяти одну смугу частот з мінімальними перешкодами один для одного. Wi-Fi системи є енергозберігаючими тому доцільно провести дослідження про можливість їх використання у цілях визначення координат проколюючої головки при прокладанні траси підземних комунікацій.

Було запропоновано розробити систему із використанням двох модулів ESP8266, які забезпечують бездротовий зв'язок на частоті 2,4 ГГц за технологією

Wi-Fi та інерційно-вимірювальним датчиком MPU-6050 для визначення координат просторового положення. Один з модулів виступає в ролі передавача а інший у якості приймача. Передавач разом із датчиком MPU-6050 поміщують у проколюючу головку бура яка розташовується у ґрунті. Приймач знаходиться над поверхнею землі та приймає сигнал від передавача.

У якості мікроконтролера був обраний малогабаритний модуль ESP-07S, який є однією з версій модулів серії ESP8266. Він має вбудовану підтримку Wi-Fi на частоті 2,4 ГГц та здатність підключення зовнішніх антен. Всередині чіп ESP-07S підтримує 32-розрядний процесор який працює на частоті 80 МГц та має 32 Кб оперативної пам'яті для інструкцій і 80 Кб для даних, Flash пам'яті – 4 Мб, має периферійну шину яка підтримує UART, I2C, I2S, HSPI, GPIO, PWM та працює за стандартом 802.11 b/g/n. Підтримує протоколи обміну інформацією IPv4, TCP, UDP, HTTP, FTP, включає 3 режими роботи – клієнт, точка доступу, та комбінований. Напруга живлення 3,3 В – 3,6 В, діючий струм 80 мА [6].

Для визначення орієнтації та положення об'єкта у тривимірному просторі використовують інерційно-вимірювальні датчики. Серед чисельних датчиків положення та прискорення було обрано малогабаритний трьохосьовий датчик MPU-6050. Цей датчик є одним із самих надійних і точних, він значно дешевший від інших, містить в собі акселерометр, гіроскоп і температурний сенсор.

MPU-6050 побудований за принципом мікроелектромеханічної (MEMS) технології. Зовнішній вплив на датчик спочатку змінює стан механічної частини, а потім зміна стану механічної частини призводить до зміни сигналу електричної частини. Всередині містить MEMS-акселерометр та MEMS-гіроскоп [7].

MEMS-акселерометр призначений для вимірювання лінійних прискорювань. Прискорення представляє собою різницю між гравітаційним і істинним прискоренням об'єкта.

MEMS-гіроскоп призначений для вимірювання кутових швидкостей. Принцип дії гіроскопів оснований на фундаментальному законі збереження кутових моментів, законі збереження моменту імпульсу.

MEMS-акселерометр та MEMS-гіроскоп працюють за принципом п'єзоелектричного ефекту. Мікроконтролер отримує відомості про напругу з п'єзоелементів і перетворює їх в кутову та лінійну швидкість в даний момент.

Для визначення кутів використовуються данні одразу з двох датчиків – гіроскопу та акселерометра. Вимірювання кута, отримані акселерометром, містять високочастотну перешкоду. Вимірювання кута гіроскопом призводить до появи низькочастотного шуму та дрейфу нуля, що виникає внаслідок інтегрування кутової швидкості. Оскільки обидва цих датчика мають недоліки і не можуть бути використані безпосередньо в системах, де потрібна висока точність оцінки кута нахилу, застосовується комплементарний фільтр, який використовує переваги кожного датчика і компенсує недоліки. Враховуючи дрейф нуля гіроскопа, ми не

можемо отримати вірні дані кутів відносно вертикальної вісі, а тільки по двох осях. Для цього додатково потрібно використовувати магнітометр.

Датчик MPU-6050 підключається до мікроконтролера ESP-07S та обмінюється з ним даними по шині I2C. Отримані дані з конденсаторів акселерометра та гіроскопа оцифровуються 16-розрядним аналого-цифровим перетворювачем (АЦП) MPU-6050 та поміщаються у регістри які надалі доступні для зчитування по шині I2C. Доступні діапазони чутливості для визначення кутової швидкості гіроскопа від ± 250 до ± 2000 градусів в секунду. Доступні діапазони чутливості для визначення лінійної швидкості акселерометра від $\pm 2g$ до $\pm 16g$. Напруга живлення 2,37 В – 3,46 В, споживаний струм до 4 мА.

Для приймача розроблена програма прийому даних у середовищі Arduino IDE, яку представлено нижче і яка дозволяє встановити бездротовий зв'язок із передавачем, отримати від нього дані та вивести їх у серійний порт для відображення на дисплеї комп'ютера. Приймач виступає у якості точки доступу до якого під'єднується передавач.

Зовнішній вид приймача наведено на рис. 1.

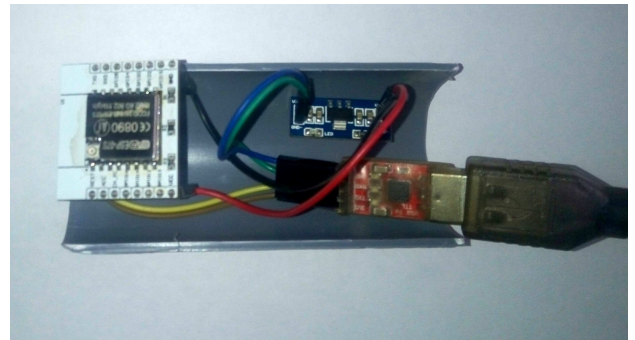


Рис. 1. Зовнішній вид макету приймача

```

/*****
/*          Програма прийому даних          */
/*****
// Підключення бібліотек
#include <ESP8266WiFi.h>
#include <WiFiUdp.h>
unsigned int localPort = 8888; //порт, з якого приймаємо
пакети даних
const int NTP_PACKET_SIZE = 64; //розмір буферу для
прийнятих пакетів
char    packetBuffer[NTP_PACKET_SIZE];    //буфер
зберігання пакетів
WiFiUDP udp;
// Базові налаштування
void setup()
{
    Serial.begin(115200); //швидкість серійного порта
    Serial.println();
    Serial.println("Configuring access point...");
    WiFi.mode(WIFI_OFF);
    WiFi.mode(WIFI_AP); //режим точки доступу
    WiFi.softAP("MPU6050","mpupassword"); //ім'я та
    пароль точки доступу

```

```

Serial.print("IP address: ");
Serial.println(WiFi.softAPIP());
Serial.println("Starting UDP");
udp.begin(localPort);
Serial.print("Local port: ");
Serial.println(udp.localPort());
Serial.println("Server started");
}
// Головний цикл програми
void loop()
{
    int parse = udp.parsePacket();
    if (!parse) {}
    else {
        udp.read(packetBuffer, NTP_PACKET_SIZE);
        Serial.println(packetBuffer);
    }
    memset(packetBuffer,0, NTP_PACKET_SIZE);
}

```

Для передавача розроблена програма у середовищі Arduino IDE, яку представлено нижче і яка дозволяє зчитувати данні з реєстрів датчика MPU-6050 для акселерометра та гіроскопа та перетворювати їх у кути нахилу. Реалізовано зв'язок із приймачем та бездротова передача даних. Передавач виступає у якості клієнта, що під'єднується за IP-адресою та локальним портом до приймача. Технічні характеристики реєстрів датчика наведені у [8].

Зовнішній вид передавача наведено на рис.2.

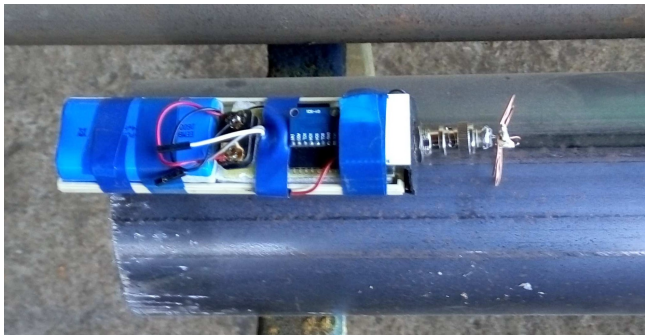


Рис.2. Зовнішній вид макету передавача

```

/*****
/*          Програма передачі даних          */
/*****
// Підключення бібліотек
#include<Wire.h>
#include <ESP8266WiFi.h>
#include <WiFiUdp.h>
// Опис констант
const uint8_t MPU = 0x68; //змінна адреси пристрою
int16_t accData[3], gyroData[3]; //змінні дані
акселерометра та гіроскопа отримані з реєстрів
double aXangle, aYangle, aZangle, gXangle, gYangle,
gZangle, gXrate, gYrate, gZrate; //змінні проміжних даних
акселерометра та гіроскопа

```

```

double compAngleX, compAngleY, compAngleZ, timer;
//змінні налаштування фільтру згладжування
int ap = 0.955; //коефіцієнт згладжування
IPAddress ip(192, 168, 4, 1); //IP адреса пристрою
unsigned int localPort = 8888; //локальний порт
WiFiUDP udp;
//Базові налаштування
void setup()
{
    Wire.begin();
    MPU_config();
    Serial.begin(115200); //Швидкість серійного порта
    Serial.println();
    WiFi.mode(WIFI_STA); //Режим клієнта
    WiFi.begin("MPU6050", "mpupassword");
    Serial.print("Connecting to server");
    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED)
    {
        delay(500);
        Serial.print(".");
    }
    Serial.println();
    Serial.print("Connected");
    udp.begin(localPort);
}
// Головний цикл програми
void loop()
{
    DataAccelerometer (accData);
    DataGyroscope (gyroData);
    aXangle = (atan2(accData[1], accData[2]) *
RAD_TO_DEG);
    aYangle = (atan2(accData[0], accData[2]) *
RAD_TO_DEG);
    aZangle = (atan2(accData[0], accData[1]) *
RAD_TO_DEG);
    gXrate = gyroData[0] / 16.5;
    gYrate = gyroData[1] / 16.5;
    gZrate = gyroData[2] / 16.5;
    timer = millis();
    gXangle += gXrate * (millis() - timer) / 1000;
    gYangle += gYrate * (millis() - timer) / 1000;
    gZangle += gZrate * (millis() - timer) / 1000;
    compAngleX = ap * (compAngleX + gXangle) + (1 -
ap) * aXangle;
    compAngleY = ap * (compAngleY + gYangle) + (1 -
ap) * aYangle;
    compAngleZ = ap * (compAngleZ + gZangle) + (1 -
ap) * aZangle;
    //Відправка даних
    udp.beginPacket(ip, 8888);
    udp.print("Signal: ");
    udp.print(WiFi.RSSI()); //чутливість сигналу
    udp.print(" dBm"); //у дБм
    udp.print("\t");
    udp.print(compAngleX);
    udp.print("\t");
    udp.print(compAngleY);
    udp.print("\t");
    udp.print(compAngleZ);
}

```

```

udp.print('\n');
udp.endPacket();
}
//Функція запису байт по адресі пристрою I2C
void writeTo(byte device, byte toAddress, byte val)
{
Wire.beginTransmission(device);
Wire.write(toAddress);
Wire.write(val);
Wire.endTransmission();
}
//Функція зчитування байт від пристрою I2C
void readFrom(byte device, byte fromAddress, int num, byte
result[])
{
Wire.beginTransmission(device);
Wire.write(fromAddress);
Wire.endTransmission();
Wire.requestFrom((int)device, num);
int i = 0;
while (Wire.available()) {
result[i] = Wire.read();
i++;
}
}
//Функція зчитування регістрів з акселерометра
void DataAccelerometer (int16_t Data[])
{
byte buffer[6];
readFrom(MPU, 0x3B, 6, buffer);
Data[0] = (((int16_t)buffer[0]) << 8) | buffer[1];
Data[1] = (((int16_t)buffer[2]) << 8) | buffer[3];
Data[2] = (((int16_t)buffer[4]) << 8) | buffer[5];
}
//Функція зчитування регістрів з гіроскопа
void DataGyroscope (int16_t Data[])
{
byte buffer[6];
readFrom(MPU, 0x43, 6, buffer);
Data[0] = (((int16_t)buffer[0]) << 8) | buffer[1];
Data[1] = (((int16_t)buffer[2]) << 8) | buffer[3];
Data[2] = (((int16_t)buffer[4]) << 8) | buffer[5];
}
//Функція налаштувань датчика MPU-6050
void MPU_config()
{
writeTo(MPU, 0x6B, 0x00); //Відключаємо режим
енергозбереження
writeTo(MPU, 0x1B, 0x00); //чутливість гіроскопу
250°/с
writeTo(MPU, 0x1C, 0x00); //чутливість
акселерометру 2g
}

```

Експериментальні дослідження цієї вимірювальної системи, які виконано в реальних умовах при розташуванні проколюючої головки на глибині 1,1 м та 1,6 м підтвердили можливість передачі та прийому інформації про координати розташування проколюючої головки на даній частоті.

Висновки

Проведені дослідження показали можливість побудови більш простої та енергозберігаючої вимірювальної системи визначення просторових координат проколюючої головки при прокладанні підземних комунікаційних трас за допомогою Wi-Fi технологій.

В порівнянні із закордонними аналогами вимірювальна система має елементну базу з суттєво меншою вартістю.

Удосконалення цієї системи є метою подальших розробок.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. Патент № 95501 Україна, МПК Е 02 F5/18. Установка для керованого проколу ґрунту / Пенчук В.О., Белицький Д.Г., Супонев В.М., Олексин В.І., Балесний С.П.; заявник та патентовласник Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Пенчук В.О., Белицький Д.Г., Супонев В.М., Олексин В.І., Балесний С.П., – № 201407764; заявл. 10.07.2014; опубл. 25.12.2014, Бюл. №24
2. Патент RU № 2132428, МПК E02F5/18 Способ определения местоположения пробойника в грунте и устройство для его реализации /В.П.Сырский, Е.А. Нестеров, А.Д. Пахомов: обладатель ОАО «НПО НИИИИП- НЗуК».- Опубл. 27.06.1999
3. Патент RU № 2442192, МПК E02F5/18 Способ определения местоположения пробойника или бура в грунте и устройство для его реализации /В.П.Сырский, Е.А. Нестеров, А.Д. Пахомов: обладатель ОАО «НПО НИИИИП- НЗуК».- Опубл. 10.02.2012
4. Патент RU № 2009298, МПК E02F5/18 Способ обнаружения пневмопробойника пределения местоположения пробойника в грунте и устройство для его реализации /Г.И. Буданов, Х.Б. Ткач, А.Д. Костылев, В.В. Трубицын: обладатель Институт горного дела СО РАН.- Опубл. 15.03.1994
5. Росс Д. Wi-Fi. Беспроводная сеть. / Д. Росс. – Санкт-Петербург: ИТ Пресс, 2007. – 320 с.
- 6.ESP-07S Datasheet. Технічна документація. –15с. (http://wiki.aithinker.com/_media/esp8266/a018ps01.pdf)
7. MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification. Технічна документація. – 52с. (<https://www.invensense.com/wpcontent/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf>)
8. MPU-6000 and MPU-6050 Register Map and Descriptions. Технічна документація. – 46с. (<https://www.invensense.com/wpcontent/uploads/2015/02/MPU-6000-Register-Map1.pdf>)