

УДК 004.7:537.8:622.1

**А.А. Кудряшов**, аспирант

Черниговский государственный технологический университет, г. Чернигов, Украина

**ZIGBEE ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ, ОСНОВАННОЕ  
НА ВРЕМЕНИ ПОЛЁТА СИГНАЛА****А.А. Кудряшов**, аспірант

Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

**ZIGBEE ПОЗИЦІОНУВАННЯ, ЩО БАЗУЄТЬСЯ НА ЧАСІ ПОЛЬОТУ  
СИГНАЛУ****A.A. Kudriashov**, PhD student

Chernihiv State Technological University, Chernihiv, Ukraine

**ZIGBEE POSITIONING BASED ON THE SIGNAL TIME OF FLIGHT**

*Рассмотрен беспроводный стандарт передачи данных физического уровня протокола IEEE 802.15.4a с точки зрения возможности определения расстояния. Рассмотрена структура пакета IEEE 802.15.4a. Проведён анализ локационных протоколов, начиная с протокола, оговоренного в стандарте, включая не входящие в стандарт протоколы, и их усовершенствования.*

**Ключевые слова:** беспроводная сеть, локационные протоколы, время полёта сигнала, позиционирование.

*Розглянуто бездротовий стандарт передачі даних фізичного рівня протоколу IEEE 802.15.4a з погляду можливості визначення відстані. Розглянуто структуру пакета IEEE 802.15.4a. Проведено аналіз локаційних протоколів, починаючи з протоколу, зазначеного у стандарті, включаючи ті, що не входять у стандарт, та їх удосконалення.*

**Ключові слова:** бездротова мережа, локаційні протоколи, час польоту сигналу, позиціонування.

*Reviewed wireless data transfer standard physical layer protocol IEEE 802.15.4a and the possibility of determining the distance. The structure of the package IEEE 802.15.4a. The analysis of radar protocols, starting with the protocol specified in the standard, including non-standard protocols and their improvement.*

**Key words:** wireless, radar reports, the flight time signal, positioning.

**Введение.** Беспроводные сети малого радиуса действия становятся всё более популярными [1]. Результатом непрерывно растущих потребностей рынка стало появление стандартов IEEE 802.15.4 и ZigBee. Многим приложениям таких сетей требуется наличие информации о местоположении. В связи с важностью определения местоположения объектов в беспроводных сетях был разработан сверхширокополосный стандарт (UWB) передачи данных IEEE 802.15.4a для сетей малого радиуса действия [2].

Стандарт IEEE 802.15.4a определяет два варианта передачи: сверхширокополосные импульсные сигналы (IR-UWB) и расширение спектра методом линейной частотной модуляции (CSS). IR-UWB система может использовать несущую частоту 250-750 МГц, 3,244-4,742 ГГц или 5,944-10,234 ГГц, тогда как CSS использует 2,4-2,4835 ГГц. Для IR-UWB варианта определение расстояния предоставляется возможным, тогда как CSS сигналы могут быть использованы только для передачи данных [2]. Так как в данной статье изучается возможность определения расстояния для стандарта IEEE 802.15.4a, то рассматриваться будет только IR-UWB вариант.

IR-UWB система использует очень узкие импульсы для передачи информации, которые обычно передаются с заданной стандартом позицией и/или полярностью импульсов [3-5]. В отличие от обычных систем IR-UWB, информация в IEEE 802.15.4a стандарте передается пакетами импульсов в определённой последовательности и фазе сигнала [2]. Другими словами, структура сигнала в поле полезной нагрузки пакета IEEE 802.15.4a представляет собой модифицированную версию классического IR-UWB. Тем не менее, для синхронизации, преамбула пакета UWB импульсов с малым коэффициентом заполнения передается по аналогии с классической IR-UWB системой.

**Принципы измерения расстояния.** В соответствии с терминологией IEEE 802.15.4a, RDEV называется совместимое устройство, в которых реализована поддержка определения расстояния, RFRAME – это кадр, который несёт информацию о расстоянии.

RFRAME указывается путем установки бита расстояния в заголовке PHY пакета IEEE.802.15.4a. Расстояние между двумя RDEV определяется обычно через двусторонний обмен RFRAME и отслеживанием его прибытия, так как показано на рис. 1. Это называется двусторонним временем прихода сигнала (TW-TOA).

Предположим, что RDEV A хочет узнать расстояние до RDEV B. Время между уходом RFRAME от A и приемом ответа RFRAME от B,  $T_r$ , может быть представлено как:

$$T_r = 2T_t + T_{ta}, \quad (1)$$

где  $T_t$  – время пролета сигнала от A к B и  $T_{ta}$  – время задержки сигнала.

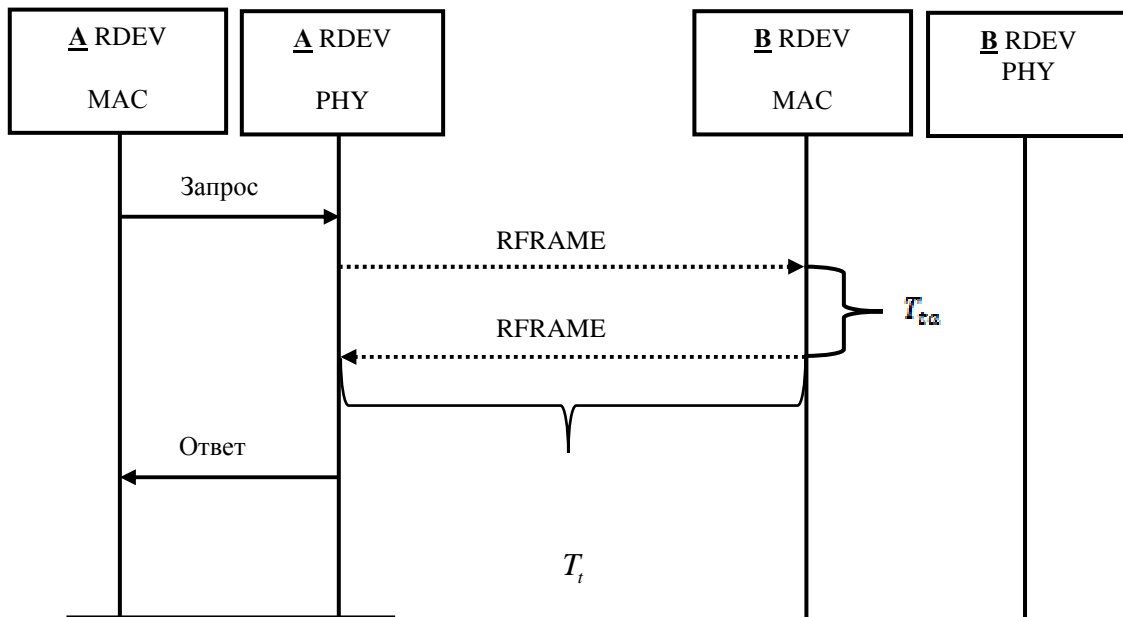


Рис. 1. Обмен сообщением в режиме двустороннего прохода сигнала при измерении расстояния

Измерение расстояния в этом режиме в большой степени зависит от того, как точно будет определено время  $T_t$ . Для одного прохода сигнала, учитывая, что в RFRAME подмешивается белый гауссов шум и согласно частному случаю неравенства Рао-Крамера, можно определить нижнюю границу дисперсии значения  $T_t$ ,

$$\sqrt{\text{Var}(\hat{T}_t)} \geq \frac{1}{2\sqrt{2\pi}\sqrt{\text{SNR}\beta}}, \quad (2)$$

где SNR – отношение сигнал-шум и  $\beta$  – эффективная ширина сигнала [6]. Очевидно, что большое значение SNR и/или более широкий спектр сигнала  $\beta$  увеличит точность определения времени пролёта  $T_t$ . UWB использует очень большой спектр, а поэтому вероятность того, что произойдет взаимная компенсация всех сигналов другими, чрезвычайно мала. Кроме того, так как для передачи применяются очень короткие импульсы, то не возникают и межсимвольные искажения – энергия принятого импульса практически всегда успевает фактически полностью затухнуть до момента прихода его следующей копии, которая к тому же еще зачастую просто обрезается в корреляторе приемника как помеха, не имеющая отношения к сигналу. Всё вышесказанное делает UWB пригодной технологией для измерения расстояния.

Как и в других беспроводных локационных системах, основными источниками ошибок в диапазоне UWB является многолучевое распространение, в условиях отсутствия прямой видимости (NLOS), и многопользовательские помехи (MUI) [7]. В разных средах скорость распространения и затухание сигнала будет разной, множественные копии передаваемого сигнала с различным уровнем затухания и времени задержки

придут к приемнику. Таким образом, при согласованной фильтрации или корреляции на основе времени полёта сигнала, результат будет иметь несколько пиков, хотя только время первого пика имеет значение. При отсутствии прямой видимости от передатчика к приёмнику при условии множественных отражений, первый пик может и не быть самым сильным [8-9].

В стандарте IEEE 802.15.4a преамбула пакета разработана с учётом многолучевого распространения сигнала для облегчения процедуры определения времени полёта.

**Структура пакета.** В сетях стандарта IEEE 802.15.4a используется формат пакета, представленный на рис. 2. Пакет состоит из заголовка синхронизации (SHR) преамбулы, заголовка физического уровня (PHR) и поля данных. Преамбула SHR состоит из преамбулы «расстояния» и начала кадра (SFD).

**Преамбула.** Количество символов в преамбуле определяться в соответствии с требованиями приложения. Там может быть 16, 64, 1024 или 4096 символов, в зависимости от задержки, мощности канала связи, соотношению сигнал-шум и совместимости с уже существующими RDEV. Использование большей длины, 1024 и 4096, является предпочтительным для приема некогерентных сигналов, что позволяет улучшить их обработку. В таком случае точность измерения времени прихода сигнала повышается.

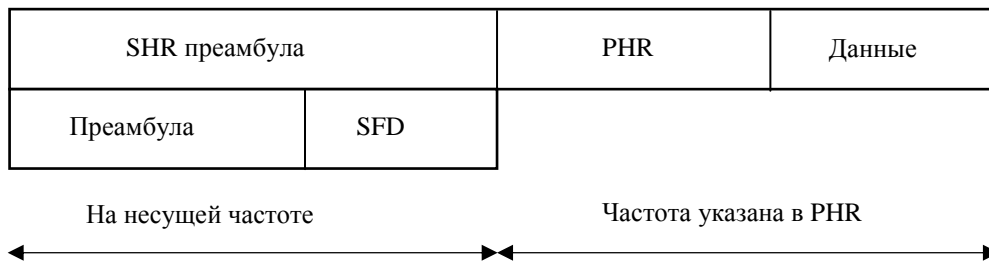


Рис. 2. Структура пакета IEEE 802.15.4a (BPSK бинарная фазовая манипуляция)

В стандарте предполагается, что приложение должно начинать локационные операции, установив длину преамбулы 1024 символа. Далее приложение должно отслеживать параметр добротности (FoM) для последующей корректировки длины преамбулы.

Преамбула – это набор из 31 трюичного символа (табл. 1). Каждый  $S_i$  элемент состоит из последовательности в 31 символ, 15 нулевых значений и 16 ненулевых значений, все  $S_i$  обладают идеальными периодичными АКФ. Другими словами, боковые лепестки АКФ равны нулю (рис. 3). Видно, что в приёмнике наблюдается минимум излучаемой мощности в канале между двумя последовательными пиками АКФ. При вычислении времени пролёта сигнала ошибки из-за боковых лепестков АКФ быть не должно.

Таблица 1

Базовые элементы преамбулы

№	Символ																															
$S_1$	-	0	0	0	0	+	0	-	0	+	+	+	0	+	-	0	0	0	+	-	+	+	+	0	0	-	+	0	-	0	0	
$S_2$	0	+	0	+	-	0	+	0	+	0	0	0	-	+	+	0	-	+	-	-	-	0	0	+	0	0	+	+	0	0	0	
$S_3$	-	+	0	+	+	0	0	0	-	+	-	+	+	0	0	+	+	0	+	0	0	-	0	0	0	0	0	-	0	+	0	-
$S_4$	0	0	0	0	+	-	0	0	-	0	0	-	+	+	+	+	0	+	-	+	0	0	0	+	0	-	0	+	+	0	-	
$S_5$	-	0	+	-	0	0	+	+	+	-	+	0	0	0	-	+	0	+	+	+	0	-	0	+	0	0	0	0	0	-	0	0
$S_6$	+	+	0	0	+	0	0	-	-	+	-	0	+	+	-	0	0	0	0	+	0	+	0	-	+	0	+	0	0	0	0	
$S_7$	+	0	0	0	0	+	-	0	+	0	+	0	0	+	0	0	0	+	0	+	+	-	-		0	-	+	0	0		-	
$S_8$	-	0	0	0	0	+	0	-	0	+	+	+	0	+	-	0	0	0	+	-	+	+	+	0	0	-	+	0	-	0	0	

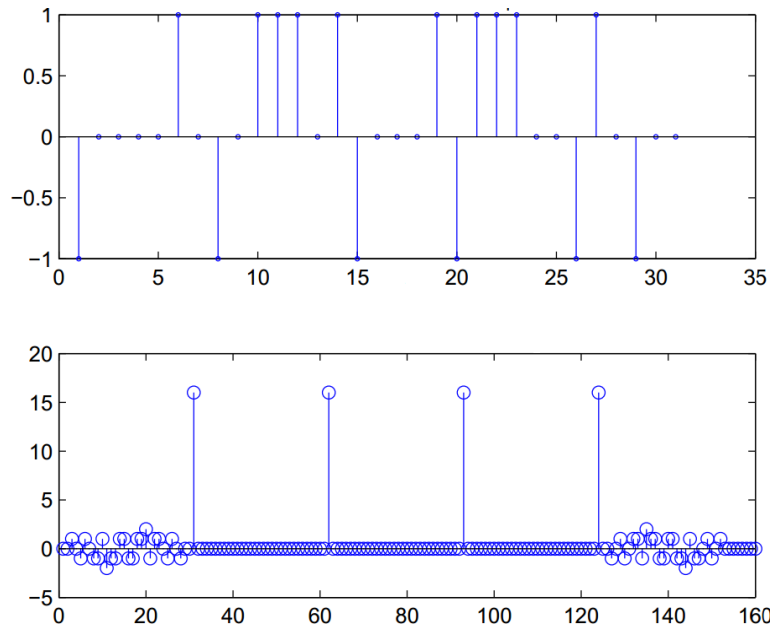


Рис. 3. Значения базового элемента преамбулы  $S_1$  (сверху), периодическая АКФ для  $S_1$  (снизу)

Предположим, что  $\varphi(t)$  – это единичный импульс UWB (рис. 3, сверху) с единичной энергией,  $T_{sym}$  – длительность базового элемента преамбулы,  $N_{sym}$  – количество повторений базового элемента,  $T_{pri}$  – интервал повторений импульсов,  $N_s$  – общее количество импульсов в одном базовом элементе,  $E_s$  – энергия одного базового элемента преамбулы. Тогда для  $i$ -го базового символа  $S_i$ , сигнал базового символа преамбулы  $\omega_i(t)$  и сигнал преамбулы  $P_i(t)$  можно представить как:

$$\omega_i(t) = \sqrt{\frac{E_s}{N_s}} \sum_{j=0}^{N_s-1} S_i[j] \varphi(t - jT_{pri}), \tag{3}$$

$$P_i(t) = \sum_{n=0}^{N_{sym}-1} N[n] \omega_i(t - nT_{sym}), \tag{4}$$

где  $S_i[j]$  –  $j$ -й символ базового элемента  $S_i$ .

SFD сигнализирует об окончании преамбулы и начале заголовка PHY. Другими словами, он используется для установки синхронизации кадров, и его обнаружение важно для точного подсчета времени  $T_{\text{та}}$ . Он может состоять из 8 или 64 символов. Стандарт IEEE 802.15.4a поддерживает обязательные короткие SFD длиной 8 символов для скорости по умолчанию 1 Мбит/с и средней скорости, и опционально поддерживает SFD длиной 64 бита для номинальной скорости 108 Кбит/с.

Пусть  $M$  – вектор, состоящий из элементов  $\{-1, 0, +1\}$ , и предположим, что его длина равна числу символов в SFD,  $L_{sfd}$ . Тогда SFD сигнал  $Z_i(t)$ , сформированный из  $M$  с базисом  $S_i$ , имеет вид:

$$Z_i(t) = \sum_{m=0}^{L_{sfd}-1} M[m] \omega_i(t - nT_{sym}), \tag{5}$$

где  $\omega_i(t)$  видно из формулы (3), тогда SHR преамбула будет иметь вид:

$$Y_i(t) = P_i(t) + Z_i(t - N_{sym}T_{sym}), \tag{6}$$

где  $P_i(t)$  описано в формуле(4).

Пусть  $M_l$  и  $M_s$  – последовательности для длинных и коротких SFD соответственно. Они должны обладать следующими основными свойствами [10]:

$M_l[k] = M_s[k], 0 \leq k \leq 7$ . Корреляционный шаблон для детектирования SFD в устройствах с высокой скоростью будет одинаков для устройств с низкой скоростью. Это

предотвращает необходимость два раза запускать коррелятор, таким образом достигается совместимость разных скоростей.

$M_1[k] = M_1[k + 8], 0 \leq k \leq 7$ . Это свойство позволяет устройствам, работающим на высокой скорости, получить два одинаковых пика АКФ, ввиду повторения передачи 8 символьной SFD. Таким образом, после получения второго пика корреляция может остановиться.

$\sum_{k=0}^7 M_1[k] = 0$  и  $\sum_{k=0}^7 M_2[k] = 0$ . Первые восемь последовательностей символов  $M_1$  и  $M_2$  должны быть уравновешены. Тогда при обработке преамбулы коррелятором выходной сигнал будет равен нулю. Преобразование SFD в таком случае не снизит точность получения SFD.

Пример длинной SFD, которая удовлетворяет всем трём требованиям, приведён в табл. 2. Следует отметить, что короткая SFD в данном случае – это первые восемь символов длинной SFD.

Таблица 2

*Длинная SFD последовательность*

№	Последовательность (длина 64)																															
$M_1$	0	+	0	-	+	0	0	-	0	+	0	-	+	0	0	-	-	0	0	+	0	-	0	+	0	+	0	0	0	-	0	-
$M_2$	0	-	0	0	+	0	-	-	0	-	+	0	0	0	0	+	+	0	0	-	-	-	+	-	+	+	0	0	0	0	+	+

В табл. 3 свойства длинной и короткой SFD последовательности представлены как отношение пика к максимуму бокового лепестка (PMSL) и пиковой мощности к средней мощности бокового лепестка (PASL) для когерентных и некогерентных приёмников.

Таблица 3

*Отношения АКФ к боковым лепесткам*

Последовательность	Когерентный приёмник		Некогерентный приёмник	
	PMSL	PASL	PMSL	PASL
$M_1$	7,27	17,6	8,06	20,9
$M_2$	6,02	13,2	6,02	18,0

**Протоколы определения расстояния.** Стандартом принято немного измененную версию обычного двухстороннего протокола обмена данными о расстоянии (TW-TOA) как основную. Также предусмотрен симметричный двусторонний обмен RFRAME (SDS-TW-TOA), который позволяет синхронизировать часы в RDEV устройствах. Оба протокола могут быть использованы для определения расстояния без предварительной синхронизации часов в RDEV. Стандартом также оговорен и защищенный локационный протокол, в котором предусмотрена защита информации о расстоянии.

**Стандартный двухполётный протокол (TW-TOA).** Это фактически протокол TW-TOA, который только оговаривает передачу пакетов  $D_2, A_2, D_4$  и  $A_4$  (рис. 4). Сначала отправитель RDEV А посылает пакет запроса расстояния  $D_2$  и получатель RDEV В отвечает подтверждением  $A_2$ . Получатель после отправки  $A_2$  посылает временную метку  $D_4$ . В конце RDEV А присылает подтверждение временной метки  $A_4$ .

Существуют пять параметров, которые характеризуют одно измерение дальности и образуют временную метку: значение счетчика начала, значение счетчика конца, два значения частотных характеристик приёмопередатчиков и параметр точности оценки времени прихода переднего фронта первого импульса PHR.

Значение счетчика начала представляет время прихода первого импульса первого символа PHR. Значения времени запуска и остановки счётчика записываются каждые 4 октета. И хотя польза этих значений только в их разнице, стандарт IEEE 802.15.4a описывает их отдельно.

Предположим, что В обнаруживает SFD метку  $D_2$  и записывает время прихода, согласно своему таймеру  $t_{B1}$ , и также записывает время  $t_{B2}$ , когда  $A_2$  покидает антенну В.

Тогда во временной метке будут записаны два значения  $t_{b1}$  и  $t_{b2}$  как время начала и конца работы таймера.

RDEV, в котором производится дополнительный подсчёт характеристик осцилляторов, генерируется смещение и интервал. Смещение — это целое знаковое число, значение которого показывает разницу в частотах между приемником и передатчиком.

К примеру, если разница между осцилляторами составляет десять из миллиона, тогда значение смещения будет 10, а значение интервала – 1 миллион.

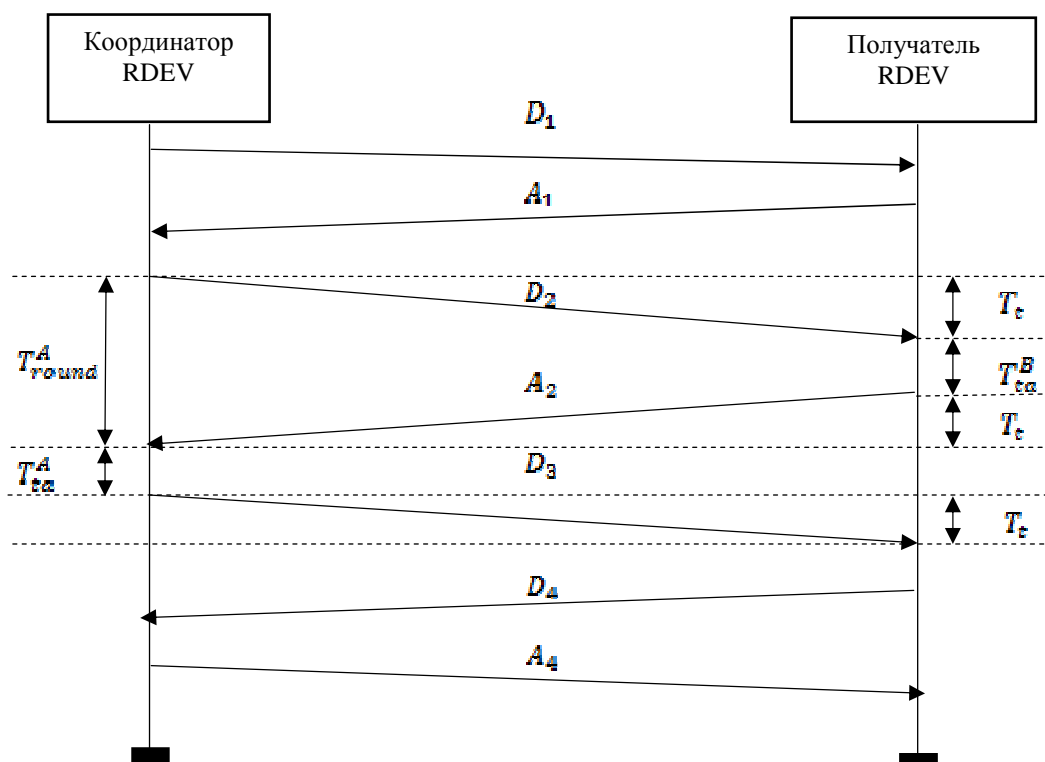


Рис. 4. Протоколы с поддержкой определения расстояния согласно IEEE 802.15.4a

FoM характеризует точность оценки времени прихода переднего фронта первого импульса PHR на антенну. FoM состоит из 3 подполей и бита расширения. Подполе уровня несёт оценку качества определения расстояния (3 бита). Интервал измерения указывается во втором подполе и может принимать значения 100 пс, 300 пс, 1 нс и 3 нс. Последнее подполе указывает на множитель интервала измерения и служит для установки некоторых промежуточных значений.

**Симметричный двусторонний двухпролётный локационный протокол (SDS-TW-TOA).** Протокол SDS-TW-TOA проиллюстрирован на Рис. 4 сообщениями  $D_2$ ,  $A_2$ ,  $D_3$ . Добавление сообщения  $D_3$  к стандартному TW-TOA уменьшает ошибку определения расстояния ввиду погрешности осцилляторов приёмника и передатчиков  $e_A$  и  $e_B$  соответственно. Из рис. 4 видно:

$$T_t = \frac{1}{4} (T_{round}^A - T_{ta}^A + T_{round}^B - T_{ta}^B). \tag{7}$$

После ввода коэффициентов  $e_A$  и  $e_B$ , которые оговаривают допуск осцилляторов, получим:

$$T_t^{SDS} = \frac{1}{4} ((T_{round}^A - T_{ta}^A)(1 + e_A) + (T_{round}^B - T_{ta}^B)(1 + e_B)). \tag{8}$$

Полагая, что  $T_{ta}^B = T_{ta}^A + \delta$  и  $\delta \gg T_t$ , то:

$$T_t^{SDS} \approx T_t + \frac{1}{4} \delta (e_A - e_B). \tag{9}$$

Стандартный режим TW-TOA описывает время [11]:

$$T_t^{TW} \approx T_t + \frac{1}{2} \delta(e_A - e_B). \tag{10}$$

Из всего этого можно сделать вывод, что протокол SDS-TW-TOA имеет ошибку вдвое меньшую, нежели стандартный TW-TOA.

**Защищённый локационный протокол.** Локация в сенсорных сетях весьма полезна, но бывают условия использования, где важна еще и достоверность полученной информации о расстоянии. Такие сети могут быть подвержены различного рода атакам.

Атаки можно разделить на:

- Несанкционированный перехват: устройство прослушивает сеть и пытается определить расстояние до защищённого (спрятанного) устройства.
- Подмешивание: устройство злоумышленника передаёт схожие RFRAME для «запутывания» определения времени прихода сигнала.
- Глушение: попытка заглушить или значительно изменить RFRAME.

Для того, чтобы сделать такие рода атаки менее действенными, был разработан защищенный локационный протокол. В таком режиме преамбула будет иметь одну из последовательностей, приведённых в табл. 4.

Устройства обмениваются по защищённому протоколу последовательностями, которые будут использоваться в следующей передаче. Это предотвращает атаки вроде «подмешивания», и делают несанкционированный перехват более сложным (перехватчику придётся прослушивать 8 разных последовательностей). Защищенный локационный протокол разделён на две части: аутентификация и локализация.

Таблица 4

Базовые последовательности преамбулы защищенного локационного протокола

№	Символ
$P_1$	+000-0000-++0-++++0-0++0+0-00-+0++00+++0++0++0-00+00-0-000-++00+0000-0++-00000+-0-000000-00-+---+000-0+0+0+++00-00+0+000
$P_2$	+000+++0-0+0-00+-0+-0-00+0+0000+0+-0000++00+0++++++0-0+-0-+0++-000-0+000+0+0+-000000+-+0-00++000-00+00+++00-++00-000000
$P_3$	0+-00+0-000-++0000-++000+0+-0-+00-+000-0-00-0-+++++0-++00++++0+00000+0-0+++0-00+00+000-0000+00-+0++0+0+0-00-0-+0+0++00000
$P_4$	++0000+000+00+-0-++0-000-00+-0+00++000+++00+0+0-0-+0-0+00+00+0+++00+++0+0-++000000-0-0000-+0-00+00000++0000-0+0+0
$P_5$	+0+00-00-+++0+0+0-000-++0-000000-0+00000-++0-0000+00-+-000-0-00+00-0++0+0-++00++0+-00-0+0++0-0++++0+-0000-000+000
$P_6$	0-00-+++00-++00+00-000++00-0-++000000-+0+0+000+0-000-++0+0-+0-0+-+++++0+00++0000-+0+0000+0+00-0-+0+00-0+0-++000+0000
$P_7$	000++0+0-+-0-00-0+0+0++0+-00+0000-000+00+00-+++0-0+00000+0++-+00+++0-++++-0-00-0-000+-00+-0-+0+000+++0000++000-0+00-+000
$P_8$	+0+-0-000+++00000+00-0+-0000-0-000000+-0+0-+++00+++++0+00+0+0-0-0+0+00+++000++0+0-+00-000-0+++0-+00+000+0000++0

Аутентификация. Сначала координатор RDEV (A) должен послать так называемый «пакет аутентификации локации» получателю RDEV (B). Этот пакет показан на рис. 4 как  $D_1$ . Основная задача пакета определить, что получатель подлинный и в зашифрованном виде передать две последовательности  $DPS_{tx}$  и  $DPS_{rx}$ , которые будут использоваться в RFRAMES  $D_2$  и  $A_2$ . Последовательности  $DPS_{tx}$  и  $DPS_{rx}$  произвольным образом выбираются из табл. 4. Если B посчитает, что A подлинный, то последует ответ АСК (показан на рис. 4 как  $A_1$ ).  $DPS_{tx}$  и  $DPS_{rx}$  выбирается каждый раз при передаче, что снижает вероятность злоумышленного подбора последовательностей в восемь раз.



Как может показаться, такой подход весьма избыточен, однако если к координатору подключено несколько устройств, то можно послать так называемый «пакет аутентификации локации» одновременно для всех подключённых устройств.

Фаза локализации. RDEV (A) посылает RFRAME  $D_2$  с  $DPS_{rx}$  преамбулой и в ответ получает  $A_2$  с  $DPS_{rx}$  преамбулой. Завершающим этапом есть посылка  $D_4$  и получение  $A_4$ .

Таким образом, передача и определение временных характеристик сигнала передается в зашифрованном виде, а отчёты временной метки передаются уже после шифрованной передачи и не чувствительны к времени «полёта».

**Выводы.** Рассмотренные протоколы обеспечивают приложения, использующие стандарт IEEE 802.15.4 данными о расстоянии в сети.

Технологии и протоколы, рассмотренные в данной статье, позволяют применять беспроводные сети ZigBee не только для передачи данных, но и могут нести информацию о расстоянии. Использование ZigBee в местах, где нет покрытия глобальных систем навигаций, таких как шахтные выработки, позволит получать ранее недоступную информацию о местоположении объектов в сети. Узкие и протяжённые ставки в шахтах сведут некогерентное распространение к минимуму, а размещение координаторов сети в зонах прямой видимости только увеличит точность определения расстояния.

Ввиду наличия защищённых протоколов передачи данных, технологию определения расстояния можно применять и в системах безопасности.

Определения расстояния происходит на физическом уровне, а значит разработчику приложения не нужно заботиться о дополнительных ресурсах для приложения.

#### Список использованных источников

1. Akyildiz F., Sankarasubramaniam W. Su. Y. and Cayirci E. A survey on sensor networks // IEEE Communications Magazine. – Vol. 40, issue 8. – Aug. 2002. – P. 102-114.
2. IEEE P802.15.4a/D4 (Amendment of IEEE Std 802.15.4), “Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LRWPANs)”, June 2006.
3. Win M. Z. and Scholtz R. A. Impulse radio: How it works // IEEE Communications Letters, 2(2). – Feb. 1998. – P. 36-38.
4. Welborn M. L. System considerations for ultra-wideband wireless networks // Proc. IEEE Radio and Wireless Conference. – Boston, MA, Aug. 2001. – P. 5-8.
5. Win M. Z. and Scholtz R. A. Ultra-wide bandwidth time-hopping spread-spectrum impulse radio for wireless multiple-access communications // IEEE Transactions on Communications. – Vol. 48, issue 4. – Apr. 2000. – P. 679-691.
6. Poor H. V. An Introduction to Signal Detection and Estimation, Springer-Verlag. – New York, 1994.
7. Localization via UWB Radios / S. Gezici, Z. Tian, G. B. Giannakis, H. Kobayashi, A. F. Molisch, H. V. Poor and Z. Sahinoglu // IEEE Signal Processing Magazine. – Vol. 22. – No. 4. – July 2005. – P. 70-84.
8. Ultra wideband geolocation / S. Gezici, Z. Sahinoglu, H. Kobayashi and H. V. Poor // In H. Arslan, Z. N. Chen and M.-G. Di Benedetto. Ultra Wideband Wireless Communications. – Wiley-Interscience, Oct. 2006.
9. Lee J-Y. and Scholtz R. A. Ranging in a dense multipath environment using an UWB radio link // IEEE Transactions on Selected Areas in Communications. – Vol. 20. – No. 9. – Dec. 2002. – P. 1677-1683.
10. Chung W. C. and Ha D. S. An accurate ultra wideband (UWB) ranging for precision asset location // Proc. IEEE Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies (UWBST'03). – Reston: VA, Nov. 2003. – P. 389-393.
11. Hach R. Symmetric double sided two-way ranging // IEEE 802.15.4a standard, doc. IEEE P.802.15-05-0334-00-004a, June 2005.