

Методи и технологии за локализация на статични и динамични обекти

Г. Желязков, Д. Иванов

Институт по информационни и комуникационни технологии – БАН, София

Methods and Technologies for Localization of Dynamic and Static Objects

G. Zheliazkov, D. Ivanov

Institute of Information and Communication Technologies–BAS

Abstract. The paper presents an overview of the methods for localization of objects using wireless communication methods. Existing methods and standards are discussed targeting applications that require people and asset location and management.

Keywords: localization, wireless, positioning, asset management

В настоящата статия се описват и анализират известните методи и средства за определяне на позицията на обекти като се обръща внимание на тези, които позволяват това да се извършва в закрити помещения, строителни площадки или други места, където използването на GPS е неприложимо по технически или финансови съображения.

1. Основни понятия

Определяне на позицията на даден обект (локализация, както го наричаме в тази статия) е пряко свързано с две понятия - измерване на *разстояние* и определяне на *положение*. За разстояние може да се счита радиусът на кръг или сфера, а положението е точка в пространството, която се описва като набор от определени координати. Това може да са разстояния или ъгли във връзка с други точки, разположени локално или глобално, в трикоординатното пространство на земята..

2. Основни методи за измерване

Тъй като е очевидно, че няма да мерим с ролетка или подобни на нея уреди, ще се спрем на използването на възможностите, които ни предлагат безжичните комуникации и по-точно, на някои специфични характеристики на радиосигнала:

Мощност на приетия сигнал (RSS- Received Signal Strength).

Мощността на електромагнитната вълна е пропорционална на излъчваната от предавателя енергия и обратно пропорционална на квадрата на разстоянието до него. Този физически закон, както и векторната сума от вълни, които достигат приемника по различни пътища (отразени сигнали), са основа за оценка, чрез силата на сигнала, на разстоянието до обекта и местоположението му.

Време на полет (ToF- Time of Flight).

Разстоянието между предавателя и приемника се равнява на “време на полет”, т.е. времето за предаване на сигнали, които се разпространяват със скоростта на светлината. Разстоянието може да се определи чрез измерване на времето на пристигане (ToA – Time of Arrival) на сигнала в приемника, когато съществува синхронизация между таймерите на предавателя и приемника или по разликата във времената на приетите сигнали от различни точки с предварително известни координати (разлика във времето на пристигане TDoA-Time Diference of Arrival). При използване на фазово-импулсна модулация времето на полет се определя от фазата на приемания сигнал.

Ъгъл на пристигане (AoA - Angle of Arrival) или посока на пристигане (DoA - Direction of Arrival).

Фронтът на вълната на предавания сигнал е перпендикулярен на посоката на разпространение. Посоката на радиовълните може да се оцени от различни известни пространствени модели на излъчване на предаващата или приемащата антена, като се следи промяната в силата на приемания сигнал. Например, ъгълът на пристигане може да бъде точно определен, ако антената е въртяща се, при което се регистрира максималната сила на сигнала. За разлика от метода RSS, не се изисква познаване на излъчваната мощност. Разстояния не могат да бъдат намерени с помощта само на едно измерване AoA. Необходими са най-малко две AoA измервания или едно AoA и едно ToF или RSS, за да се определи позицията на обекта.

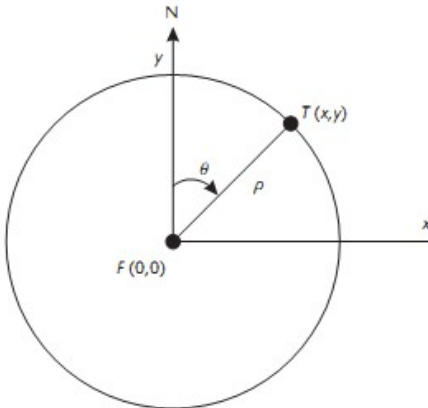
За целите на тази статия приемаме, че обектът освен всичките си други характеристики, може да предава, приема и анализира радиосигнала и закодираната в него информация. В този смисъл той може да се тълкува и като безжичен терминал.

3. Основни методи за локализация

Описани са четири геометрични метода за изчисление на местоположението. Това са различни комбинации на основните измервания на разстояния между две точки, представено чрез гръцкото ρ (Ро) и ъгъл на пристигане на сигнала θ (Тита).

Ро-Тита

Когато е възможно едновременното установяване на посоката и измерване на разстоянието, достатъчен е само един фиксиран възел, за да се определят координатите на слепия възел, както е показано на Фиг.1. Целта е разположена на пресечната точка между окръжност с радиус разстоянието между референтния възел F и слепия - T и правата, която ги свързва. Правата FT е на ъгъл θ от ординатата, насочена на север. Този метод е приложим при насочена антена, както е показано на диаграмата, която е фиксирана в центъра на координатната система $F(x=0,y=0)$. Установяване на посоката може да се извърши и в T, ако е монтиран специализиран приемник.



Фиг.1 Ро-Тита локализация

Ако $F(x=0,y=0)$ е център на координатната система, то координатите на $T(x,y)$ се изчисляват чрез равенствата:

$$x = \rho \cdot \sin(\theta) \quad (1)$$

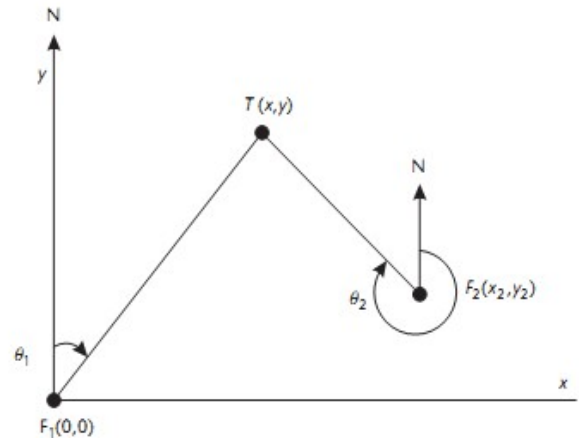
$$y = \rho \cdot \cos(\theta). \quad (2)$$

Тита-Тита или AoA

Насочени антени могат да се използват в две или повече точки, чиито координати са известни. Геометричната процедура за изчисляване на координатите се нарича триангулация. Едно от предимствата на този метод е, че целевата посока може да бъде определена без да е необходима синхронизация или ограничения за типа модулация θ_1 и θ_2 се определят по посока на часовниковата стрелка спрямо север. Ако F_1 е център на системата, то координатите на $T(x,y)$ са:

$$y = [y_2 \cdot \tan(\theta_2) - x_2] / [\tan(\theta_2) - \tan(\theta_1)] \quad (3)$$

$$x = y \cdot \tan(\theta_1) \quad (4)$$



Фиг.2 Тита-Тита локализация

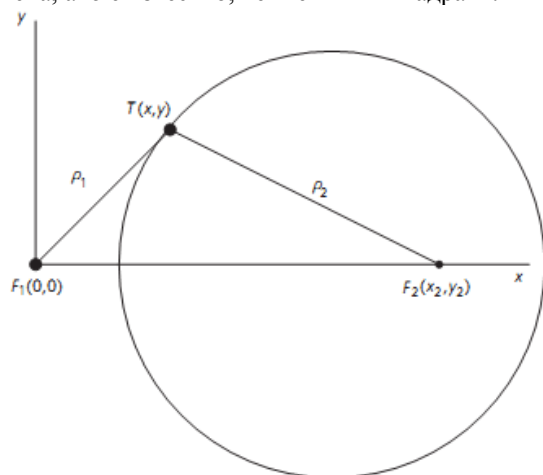
Точността на изчислената позиция зависи преди всичко от насочеността на антените. Обикновено насочените антени са значително по-големи от радиалните. Антени с електронно управление позволяват автоматично установяване на посоката. Тита-Тита често се използва за локализиране на диви животни, където липсва безжично измерване на разстоянието.

3.3 Ро-Ро или ТоА

И при двата метода Ро-Ро/ТоА и TDoA местоположението се установява, чрез латерация, с използване на данни само за разстояние. Разстоянието може да се определя чрез силата на приемания сигнал (RSS) или чрез измервания на времето на полет. Ако предавателят и приемника са със синхронизирани часовници, тогава приемникът може да измери времето на полет, след като знае момента на предаване на сигнала. Най-малко два фиксирани терминала са необходими, за да се изчисли позицията в две измерения. При триизмерна координатна система са необходими три или повече фиксирани терминала. При едностранна система, стационарните станции са предаватели-маяк, а целта е приемник. Многостранните системи използват фиксирани приемници, за да се изчисли разстоянието до предаващата цел. Геометрия за определяне на двуизмерното местоположение чрез измерване на разстояние е показано на фиг.3.

Координатите на два фиксирани терминала, F_1 и F_2 са известни в дадена координатна система, определена от осите X и Y и начало в F_1 . Ако можем да намерим разстоянията ρ_1 и ρ_2 , можем да определим и координатите на T като пресечна точка на две окръжности. Тъй като две кръжности се

пресичат в две точки, ще приемем че задачата е решена, ако е известно, че T е в 1-ви квадрант.



Фиг.3 Po - Po или ToA локализация

За да се премахне двусмислието, е необходима трета фиксирана точка. Чрез прилагане на методите ToA или RSS се определят разстоянията TF_1 и TF_2 , както следва. Приемаме, че и трите станции имат часовници с висока прецизност и са синхронизирани. Един импулс от T в момент t_0 , се получава в F_1 по време t_1 и в F_2 по време t_2 . T уведомява F_1 и F_2 , за момента на предаване t_0 . По долните формули приемниците F_1 и F_2 изчисляват разстоянията ρ_1 и ρ_2 , използвайки разликите във времето и скоростта на светлината c .

$$\rho_1 = (t_1 - t_0) \cdot c \quad (5)$$

$$\rho_2 = (t_2 - t_0) \cdot c \quad (6)$$

Уравненията на двете окръжности с радиуси ρ_1 и ρ_2 имат вида:

$$\rho_1^2 = x^2 + y^2 \quad (7)$$

$$\rho_2^2 = (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 \quad (8)$$

Тази система от две нелинейни уравнения може да се реши по x и y .

1.1. TDoA и хиперболичните криви

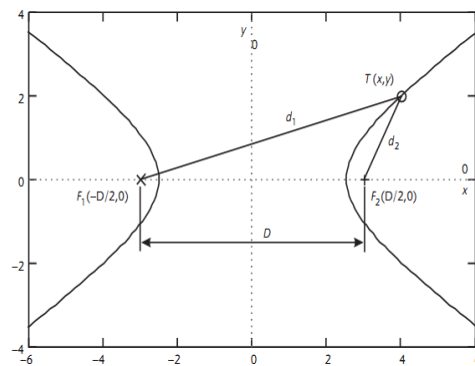
ToA дава директен начин да се определи позицията на обекта, чрез измерване на времената, но може да има неудобства за много приложения. По-точно, поддържането на синхронизирани часовници във всички станции, които участват в измерванията, както и предаването на информация за началото на сеанса до всички приемници.

Другият геометричен метод за определяне на местоположение, TDoA, няма тези недостатъци. Необходимо е само предаване на сигнал от разпознаваема, недвусмислена отправна точка. Данните, използвани в изчисленията са разликите във времето на приемане на сигнал от няколко базови станции без действителното време на полет на сигнала от обекта до стационарните станции. В

система, която има мобилен обект и две фиксирани базови станции, може да се измери разликата във времето на пристигане на сигнала, изпратен от мобилния обект и получен във фиксираните станции. Тези стойности на разликата във времето не са достатъчни, за да се изчислят двете координати на позицията. Така че, за да има достатъчно данни, TDoA изисква още една базова станция. Часовниците само на стационарните станции трябва да бъдат синхронизирани.

TDoA се използва едностранно, като обектът сам определя своята собствена позиция чрез сигналите на фиксираната станция или многостранно, където данните за разликите се събират от фиксираните базови станции. Фиг.4 показва геометрично решение за TDoA в две измерения. Обектът T предава импулс в момент t_0 , който е приет от F_1 в t_1 и F_2 в t_2 . Часовниците на F_1 и F_2 са синхронизирани, но не и часовникът T и t_0 не е известно. Въпреки това, разликата във времето на пристигане, което е $t_2 - t_1 = (t_2 - t_0) - (t_1 - t_0)$, може да бъде изчислено. Времената от дясната страна на уравнението са пропорционални на разстоянията d_1 и d_2 , тъй като сигналът се разпространява със скоростта на светлината c . Ето защо разликата на разстоянията между две фиксирани станции и обекта е:

$$\Delta d = d_2 - d_1 = c \cdot (t_2 - t_1).$$



Фиг.4 Геометрия на TDoA

Когато всички станции са в една равнина, геометричното място на точки, чиято разлика Δd , от разстоянията до F_1 и F_2 , е постоянна, е хипербола. По този начин разликата във времето на пристигане, което е получено чрез измервания ToA от две синхронизирани стационарни станции показва, че обектът се намира някъде на хиперболата с фокуси F_1 и F_2 . За точно определяне на координатите на обекта е необходима трета фиксирана станция F_3 и извършване на същите манипулации между станции F_3 и F_1 или F_3 и F_2 . Това ще определи още две хиперболи и точността на измерване ще се повиши значително. В горните обяснения се приема многостранна система с обект предавател и

фиксираны станции - приемници. Геометрията ще бъде същата при едностранна система, където обекта измерва времето на пристигане на сигнали от три или повече стационарни станции, чиито локации са известни. Въпреки това, времето на предаване на стационарните станции трябва да се разпредели така, че предаванията им да са разместени във времето. Когато обектът знае програмното време на всяка станция, той може да оцени разликите във времето на пристигане.

Уравнението на хипербола е

$$x^2/a^2 - y^2/b^2 = 1 \quad (9)$$

Изчислението на а и b чрез известните Δd и D, е по формулите:

$$a^2 = (\Delta d/2)^2 \quad (10)$$

$$b^2 = (D/2)^2 - a^2 \quad (11)$$

4. Локализация с използването на Zigbee инфраструктура

Локализацията на възел с използването на стойността RSSI от LQI на ZigBee възел предлага възможността за предоставяне на пространствени данни, без никакви допълнителни изисквания към хардуера на съществуващото решение. Процесът на локализация включва използването на трилатерационно изчисление при пресичане на три окръжности, чиито радиуси се получават от разстоянието изчислено чрез стойността RSSI. За да работи този модел, се изисква предаващият възел да бъде вътре в пресечната точка на три други приемачи възли, чиито места са предварително известни. Една от възможностите за получаване на разстоянието е измерване на мощността на входящия радио-сигнал. Идеята за RSS е, че зададената мощност на излъчване в предавателно устройство P_{TX} пряко влияе на приеманата мощност в приемника P_{RX} . Според уравнението на Фрийс за предаване в открити пространства, мощността на сигнала намалява квадратично с разстоянието до предавателя:

$$P_{RX} = P_{TX} \cdot G_{TX} \cdot G_{RX} \cdot (\lambda / 4\pi d)^2 \quad (12)$$

Където:

P_{RX} - приета мощност от приемника

P_{TX} - излъчена мощност от предавателя

G_{TX} - коефициент на усилване на предавателната антена

G_{RX} - коефициент на усилване на приемната антена

λ - дължина на вълната

d - дистанция между приемника и предавателя

При вградените устройства, нивото на получения сигнал се превръща в индикатор за силата на сигнала

(RSSI), който се определя като съотношението на получената мощност към референтната мощност P_{ref} . Обикновено референтната мощност представлява абсолютна стойност $P_{ref} = 1 \text{ mW}$, т.е. RSSI се измерва в dBm.

$$RSSI = 10 \cdot \log(P_{RX} / P_{ref}) \text{ dBm} \quad (13)$$

Увеличаването на мощността на получения сигнал води до повишаване на индикатора RSS. Разстоянието (d), индиректно, е пропорционално на RSSI. В практически сценарии, идеално приемане на P_{RX} не се получава, тъй като на разпространението на радио-сигнала влияят много фактори. Стойността на RSSI се предоставя от PHY-слоя на мрежата ZigBee. Има няколко фактора, които влошават стойността на RSSI в безжичните мрежи:

- Отражение от метални предмети
- Наслагване на електро-магнитни полета
- Дифракция по краищата
- Пречупване в среди с различна скорост на разпространение на вълната
- Поляризация на електро-магнитни полета
- Неадаптирани MAC протоколи

Базираното на RSSI измерване на разстояние до целевия възел може да се използва за изчисляване на местоположение чрез трилатералната формула. Предложени са малко методи за мултилатерация за решаване на проблема с локализация в 3D пространството като Semidefinite програмиране, MDS-MAP за централизиран алгоритмичен подход, Diffusion based Multilateration и Gradient based Multilateration.

Трилатерация

Трилатерацията е метод за определяне на относителната позиция на обекти, използвайки геометрията на триъгълниците по подобен начин като триангулацията. За разлика от триангулацията, която използва измерване на ъгли (заедно с най-малко едно известно разстояние), за да се изчисли местоположението на обекта, трилатерацията използва известните позиции на две или повече референтни точки и измереното разстояние между обекта и всяка референтна точка. За точното и еднозначно определяне на местоположението на точка от 2D равнина само с трилатерация, обикновено са необходими най-малко 3 отправни точки (най-малко 4 точки са необходими в 3D равнина).

Уравнението на сфера, известно от геометрията, има вида:

$$d^2 = x^2 + y^2 + z^2 \quad (14)$$

За сфера с център точката (x_a, y_a, z_a) уравнението се модифицира в:

$$d^2 = (x - x_a)^2 + (y - y_a)^2 + (z - z_a)^2 \quad (15)$$

Приемаме че, всички възли се разположени в една и съща равнина, която пресича трите сфери в

три взаимнопресичащи се окръжности. Избираме три референтни възела (a, b и c), които са на разстояние (d_a, d_b, d_c) от целевия възел, както следва:

$$\text{сфера A: } d_a^2 = (x - x_a)^2 + (y - y_a)^2 \quad (16)$$

$$\text{сфера B: } d_b^2 = (x - x_b)^2 + (y - y_b)^2 \quad (17)$$

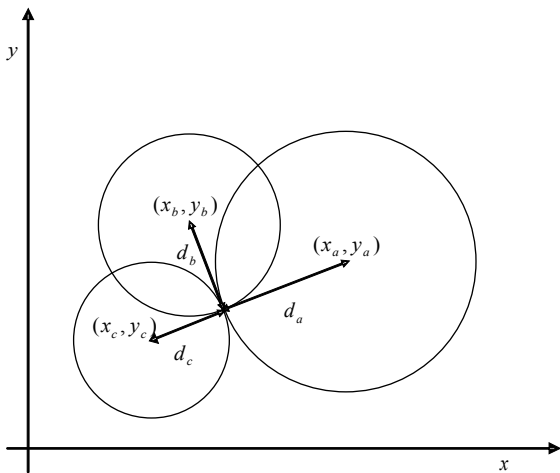
$$\text{сфера C: } d_c^2 = (x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 \quad (18)$$

Развиваме уравнения (16), (17) и (18) във вида:

$$d_a^2 = x^2 - 2x x_a + x_a^2 + y^2 - 2y y_a + y_a^2 \quad (19)$$

$$d_b^2 = x^2 - 2x x_b + x_b^2 + y^2 - 2y y_b + y_b^2 \quad (20)$$

$$d_c^2 = x^2 - 2x x_c + x_c^2 + y^2 - 2y y_c + y_c^2 \quad (21)$$



Фиг.5 Пресечна точка на 3 сфери

Трите уравнение (16), (17) и (18) са три нелинейни уравнения на две променливи, които могат да се решат чрез изключване на квадратните членове и да получим две линейни уравнения определящи равнина, която пресича сферите. Изваждаме уравненията на две сфери (19) от (20) и (21) от (20) и получаваме линейните уравнения (22) и (23):

$$d_b^2 - d_c^2 = 2x(x_c - x_b) + x_b^2 - x_c^2 + 2y(y_c - y_b) + y_b^2 - y_c^2 \quad (22)$$

$$d_b^2 - d_a^2 = 2x(x_a - x_b) + x_b^2 - x_a^2 + 2y(y_a - y_b) + y_b^2 - y_a^2 \quad (23)$$

Пренареждаме уравненията по x и y и въвеждаме V_a и V_b , които зависят от координатите на референтните възли и разстоянията им до слепия възел.

$$x \cdot (x_b - x_c) - y \cdot (y_b - y_c) = \{(x_c^2 - x_b^2) + (y_c^2 - y_b^2) + (d_b^2 - d_c^2)\} / 2 = V_a \quad (24)$$

$$x \cdot (x_b - x_a) - y \cdot (y_b - y_a) = \{(x_a^2 - x_b^2) + (y_a^2 - y_b^2) + (d_b^2 - d_a^2)\} / 2 = V_b \quad (25)$$

Решаваме системата уравнения (24) и (25), и получаваме координатите "x" и "y" на пресечната точка. Ако уравненията не водят до реални решения, това означава, че две от сферите нямат пресечна точка.

$$y = [V_b(x_b - x_c) - V_a(x_b - x_a)] / [(y_a - y_b)(x_b - x_c) - (y_c - y_b)(x_b - x_c)] \quad (26)$$

$$x = [y \cdot (y_a - y_b) - V_b] / (x_b - x_c) \quad (27)$$

Локализиране на възел с използването на трилатерация от възли с известни координати

Трилатерация (или мултилатерацията) в 2D равнина изисква пресичане на най-малко три окръжности с известни координати на действителното местоположение. Реален обект на земната повърхност може да бъде представен от няколко координатни системи, като (двойката - ширина, дължина), Universal Transverse Mercator (UTM) и Universal Polar Stereographic (UPS) или дори първични декартови координати, които приемат, че центърът на земята е нулата. Географска ширина и дължина са най-използваната координатна система за гражданска употреба и естествено стават стандарт за GPS и GIS картографиране. Ширината е ъгълът от точка на повърхността на Земята спрямо екваториалната повърхност. Линии, свързващи точки на същата географска ширина се наричат паралели, които очертават концентрични кръгове на повърхността на Земята, успоредно на екватора. Северният полюс е $90^\circ N$, а Южния полюс е $90^\circ S$. За 0° паралел е определен от екватора, който се явява основната равнина на всички географски координатни системи. Екваторът разделя земното кълбо на северно и южно полукълбо. Географска дължина (съкращение. Long, X, или lambda) е ъгълът на изток или на запад от референтния меридиан между двата географски полюса на друг меридиан, който минава през произволна точка. Всички меридиани са половинките на големи кръгове, и не са паралелни. Те се събират в Северния и Южния полюс.

5. Сравнение на безжичните технологии, които се използват за локализация

Технологиите и стандартите за безжични комуникации се развиват много динамично, което налага да се направи сравнение на техните възможности от гледна точка на използването им за локализация на обекти. Като заключение на тази публикация са сравнени IEEE стандартизираните безжични стандарти включително 802.11x безжични мрежи WLAN, Wi-Fi и 802.15.x безжични персонални мрежи WPAN, Bluetooth, UWB и ZigBee. В Таблица са сравнени основните характеристика на различните стандарти.

Wi-Fi

В момента най-разпространената спецификация от IEEE 802.11 WLAN стандарти е Wi-Fi. Wi-Fi работи в нелицензирания обхват 2.4 GHz (industrial, scientific, and medical -ISM). Това дава възможност за разширяване или подмяна на съществуващи жични мрежи в индустрията, дома и при зоните за свободен достъп (hot spots). Тази технология има известни предимства:

- ниска цена;
- голямо покритие
- налична е на много места и има голямо покритие;
- стабилност.

Локализацията чрез Wi-Fi се счита за икономически ефективно решение в затворени пространства. Обикновено се използва RSSI и типичната точност е около 3 - 30 m, като позицията се актуализира за няколко секунди. Недостатък се счита намаляването на точността при затворени пространства със сложна конфигурация.

Bluetooth

Тази технология беше разработена за комуникация на малки преносими устройства на къси дистанции. Използваната честота е 2.4 GHz. Bluetooth използва FHSS (fast, frequency-hopping spread spectrum) технологията за избягване на интерференцията и осигуряване на надежност на предаването на данни. Широкото разпространение на Bluetooth при малките преносими устройства започва да го прави привлекателно за локализиране. Точността е сходна с тази на Wi-Fi като се използва метода RSSI. Един от факторите за понижаване на точността е силната интерференция.

UWB

При UWB технологията се изпращат много къси и маломощни електромагнитни импулси. Предавателите използват честота от 3.1 GHz до 10.6 GHz като радиочестотният спектър покрива много широка честотна лента. UWB има определени предимства като:

- много слаба интерференция от други радиосистеми;
- малък обхват и широка честотна лента (short-range high-bandwidth);
- високи скорости на предаване на данни;
- възможности за фина настройка на обхвата.

Използването на тази технология при радарите за военни цели ограничава приложението ѝ. Използва се методът за измерване ToA, който дава възможност за постигане на висока точност - отклонение по-малко от 1m.

Таблица

ZigBee

ZigBee е стандарт за безжична меш мрежова комуникация, предназначена за дистанционно наблюдение и комуникация. Стандартизиран са физическото и MAC ниво като целта е нискоскоростна и евтина WPAN. Основни характеристики на ZigBee:

- ниска скорост на предаване на данни;
- минимална консумация;
- относително не сложна организация;
- висока надежност и сигурност.

Този стандарт вече се използва в много приложения, които изискват локализация като проследяване на диви и домашни животни, проследяване на обекти и събития от военните, проследяване на обекти в открити пространства при строителството, минната индустрия и др.

6. Заключение

От направените сравнения на безжичните технологии и методи за локализация в закрити помещения, строителни площадки или други места като водещи се налагат ZigBee технология и съответно RSSI метода.

7. Използвана литература

8. 1. Localization in Wireless Sensor Networks with Known Coordinate Database

Zhen Fang,1 Zhan Zhao,1 Xunxue Cui,2 Daoqu Geng,1,3 Lidong Du,1,3 and Cheng Pang1,3

State Key Laboratory of Transducer Technology, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2. D. Lymberopoulos, Q. Lindsey, and A. Savvides, "An empirical characterization of radio signal strength variability in 3-D IEEE 802.15.4 networks using monopole antennas," in *Proceedings of the 3rd*

	Wi-Fi	Bluetooth	UWB	ZigBee
Обхват	100 m	10/100 m	30 m	10/100 m
Стандарт	IEEE 802.11b,g	IEEE 802.15.1	IEEE 802.15.3a	IEEE 802.15.4
Честотна лента	2.4 GHz	2.4 GHz	3.1 GHz-10.6 GHz	868/915 MHz, 2.4 GHz
Скорост данни	Up to 22 Mb/s	1 Mb/s	40-600 Mb/s	20/40/250 kb/s
Топология	32 active nodes	8 active nodes	Not applicable	255 active nodes
Живот на батерията	часове	дни	часове	дни
Себестойност	Относително висока	Относително ниска	Най-висока	Най-ниска
Типично приложение	Безжичен достъп интернет	Достъп глас и данни, Ad-hoc мрежови достъп	Високо скоростна мрежа, радари	Дистанционен мониторинг и управление

European Workshop on Wireless Sensor Networks (EWSN '06), vol. 3868 of *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 326–341, Zurich, Switzerland, February 2006.

3. S. Chen, Y. Chen, and W. Trappe, “Exploiting environmental properties for wireless localization and location aware applications,” in *Proceedings of the 6th Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom '08)*, pp. 90–99, March 2008.

4. Real-time Localization for Wireless Sensor Networks with multiple beacon transmissions

G. S. Paschos, E. D. Vagenas, S. A. Kotsopoulos
Wireless Laboratory, University of Patras, Greece

5. Ultra-wideband Positioning Systems
Theoretical Limits, Ranging Algorithms and Protocols
Zafer Sahinoglu, Sinan Gezici and Ismail Guvench