

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV INFORMAČNÍCH SYSTÉMŮ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY  
DEPARTMENT OF INFORMATION SYSTEMS

LOKALIZACE UZLŮ V SENZOROVÉ SÍTI ZIGBEE

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. RICHARD CAPALINI

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV INFORMAČNÍCH SYSTÉMŮ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY  
DEPARTMENT OF INFORMATION SYSTEMS

# LOKALIZACE UZLŮ V SENZOROVÉ SÍTI ZIGBEE

NODE LOCATION IN THE ZIGBEE NETWORK

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. RICHARD CAPALINI

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Mgr. ROMAN TRCHALÍK

BRNO 2010

## Zadání diplomové práce

Řešitel: **Capalini Richard, Bc.**

Obor: Počítačové systémy a sítě

Téma: **Lokalizace uzlů v seznorové síti ZigBee**  
**Node Location in the ZigBee Network**

Kategorie: Počítačové sítě

### Pokyny:

1. Seznamte se ze způsobů lokalizace uzlu v sítích. Zaměřte se na přesnost měření (přenosová cesta, časování) synchronizací hodin.
2. Popište význam jednotlivých vrstev v architektuře ZigBee z pohledu lokalizace uzlu v síti.
3. Zhodnoťte možnosti lokalizace uzlu v síti ZigBee.

### Literatura:

- Ilyas, M., Mahgoub, I.: Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Sensing Systems, CRC Press LLC, Boca Raton, FL, USA, 2004.
- National Institute of Standards and Technology, NIST IEEE 1451, [online] <<http://www.motion.aptd.nist.gov>>
- ZigBee Alliance: ZigBee Specification v 1.1. ZigBee Alliance Board of Directors, 2006. [online] <<http://www.zigbee.org>>
- Pužmanová, R.: Routing and Switching, Time of convergence, ISBN: 9780201398618
- Furht, B., Ilyas, M.: Wireless Internet Handbook, ISBN:9780849315022
- Localization Algorithms and Strategies for Wireless Sensor Networks (Premier Reference Source), ISBN: 978-1605663968

Při obhajobě semestrální části diplomového projektu je požadováno:

- Body 1-3.

Podrobné závazné pokyny pro vypracování diplomové práce naleznete na adrese

<http://www.fit.vutbr.cz/info/szz/>

Technická zpráva diplomové práce musí obsahovat formulaci cíle, charakteristiku současného stavu, teoretická a odborná východiska řešených problémů a specifikaci etap, které byly vyřešeny v rámci ročníkového a semestrálního projektu (30 až 40% celkového rozsahu technické zprávy).

Student odevzdá v jednom výtisku technickou zprávu a v elektronické podobě zdrojový text technické zprávy, úplnou programovou dokumentaci a zdrojové texty programů. Informace v elektronické podobě budou uloženy na standardním nepřepisovatelném paměťovém médiu (CD-R, DVD-R, apod.), které bude vloženo do písemné zprávy tak, aby nemohlo dojít k jeho ztrátě při běžné manipulaci.

Vedoucí: **Trchalík Roman, Mgr.**, UIFS FIT VUT

Datum zadání: 21. září 2009

Datum odevzdání: 26. května 2010

**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
Fakulta informačních technologií  
Ústav informačních systémů  
612 66 Brno, Božetěchova 2



doc. Dr. Ing. Dušan Kolář  
vedoucí ústavu

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce se zabývá problematikou lokalizace uzlů v bezdrátové senzorové síti WSN (Wireless Sensor Network) postavené na technologii ZigBee. Práce poskytuje popis architektury ZigBee včetně popisu signálů. Metoda určování souřadnic není principiálně závislá na použitých měřicích metodách. Samostatnou kategorií tvoří metoda otisku (fingerprinting), která je založena pouze na statistickém zpracování dat RSSI (Received Signal Strength Indicator). Určení souřadnic pohyblivého uzlu vyžaduje vždy zjištění vzdálenosti (ToA), času příchodu signálu nebo úhlu dopadu signálu (AoA) vzhledem k několika pevným uzlům v závislosti na počtu souřadnic. Autor našel tři možná řešení měření vzdálenosti a jedno řešení měření úhlu dopadu signálu použitelná v kontextu bezdrátových senzorových sítí ZigBee. Diskutuje pak možnosti a omezení sítě v závislosti na použitém typu měření.

## **Abstract**

The master thesis is concerned with problem of localization of nodes in wireless sensor network WSN implemented by ZigBee technology. The thesis provide description of ZigBee architecture involving signal description. The method of evaluating coordinates basically do not depend on used measuring methods. The method of fingerprinting is included in separated category based on only statistical processing of RSSI data. Determination of coordinates of mobile node always needs finding out range, signal time of arrival (ToA) or angle of arrival (AoA) in respect to anchors node given dimension magnitude. The author found out three possible solutions for range measuring and one solution for angle of arrival measuring useable in context of ZigBee wireless sensor network. Finally the author discuss possibilities and constraints of ZigBee network with used measuring type.

## **Klíčová slova**

Lokalizace, ZigBee, IEEE 802.15.4, bezdrátová senzorová síť, trilaterace

## **Keywords**

Localization, ZigBee, IEEE 802.15.4, wireless sensor network, trilateration

## **Citace**

Capalini Richard: Lokalizace uzlů v senzorové síti ZigBee, diplomová práce, Brno, FIT VUT v Brně, 2010

# Lokalizace uzlů v senzorové síti ZigBee

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Mgr. Romana Trchalíka.

Další informace mi poskytli Ing. Richard Capalini, CSc.

Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

.....  
Richard Capalini  
24.5.2010

## Poděkování

Velmi rád bych poděkoval a vyslovil uznání všem, kteří mi pomáhali při vzniku této práce. Především Mgr. Romanu Trchalíkovi, vedoucímu mé diplomové práce za trpělivé vedení a množství praktických rad. Dále bych chtěl poděkovat rodičům za poskytnuté zázemí a Ing. Richardu Capalinimu, CSc., který mi pomohl cennými informacemi a zasvěcením do problematiky.

© Richard Capalini, 2010

*Tato práce vznikla jako školní dílo na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě informačních technologií. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez udělení oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů..*

# Obsah

Obsah .....	1
Úvod .....	2
1 Bezdrátové senzorové sítě.....	4
1.1 Síť typu ad-hoc .....	4
1.2 Bezdrátové senzorové sítě .....	5
1.3 Aplikace ve WSN .....	6
2 ZigBee.....	11
2.1 Architektura .....	12
2.2 Fyzická vrstva.....	13
2.3 Linková vrstva .....	17
2.4 Síťová vrstva.....	19
2.5 Aplikační vrstva.....	20
3 Analýza aktuálního stavu problematiky.....	21
4 Signály v síti ZigBee.....	24
5 Měření vzdáleností a úhlů mezi uzly .....	26
5.1 Odhad vzdálenosti uzlů z útlumu signálu .....	26
5.2 Odhad vzdálenosti uzlů ze zpoždění přijatého signálu .....	28
5.3 Odhad vzdálenosti uzlů z přepínání nosných kmitočtů .....	30
5.4 Odhad směru dopadu signálu.....	31
6 Lokalizace uzlu v síti .....	32
6.1 Souřadnicové soustavy .....	32
6.2 Dálkoměrný systém určování souřadnic.....	35
6.3 Časoměrný systém určování souřadnic.....	37
6.4 Směroměrný systém určování souřadnic .....	37
6.5 Metoda „otisku“ (fingerprint).....	38

# Seznam zkratek

WSN	Wireless Sensor Network
SURAN	Survivable Radio Network
MANet	mobile ad-hoc network
VANet	Vehicular Ad-hoc Networks
WMN	Wireless Mesh Network
MAC	Medium Access Control
RFID	radio-frequency identification
TDMA	Time Division Multiplex
FCS	Forward Control Sum
RBS	Reference Broadcast Synchronization
LR-WPAN	Low Rate-Wireless Personal Area Network
PHY	Physical layer
SSP	Security Service Provider
SAP	Service Access Point
CAP	Clear Channel Assesment
PPDU	Physical Protocol Data Unit)
QPSK	Offset-Quadrature Phase Shift Keying
CSMA/CA	Collision Sense Multiple Access / Collision Avoidance
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
CAP	Contention Access Period
GTS	Guaranteed Time Slots
EP	End Point
RSS	Received Signal Strength
RSSI	Received Signal Strenght Indicator
ToA	Time Of Arrival
TDoA	Time Difference Of Arrival
AoA	Angel Of Arrival
LQI	Link Quality Indicator
FSL	Free Space Loss
PER	Packet Error Rate
LOS	Light Of Sight
JNS	Jeden Nejbližší Soused
VKNS	Vážený K – Nejbližší Sousedi
KNS	K – Nejbližší Sousedi



# Úvod

Tato diplomová práce se zabývá problematikou lokalizace uzlů v bezdrátové senzorové síti WSN (Wireless Sensor Network) postavené na technologii ZigBee. Jejím cílem je nalézt aplikovatelné metody lokace zasazené do kontextu ZigBee. Tento typ sítí je navrhován pro účely monitorování a řízení, které v aplikacích vyžadují husté nasazení snímacích zařízení nebo, kde prostředí nasazení je nevhodné, anebo dokonce nebezpečné pro člověka. Sítě WSN jsou charakteristické jako značně aplikačně závislé. Existuje tak celá řada navrhovaných komunikačních protokolů, které jsou vhodné pro určité aplikace. Tradiční architektura ISO-OSI (Open System Interconnection) komunikace bývá nahrazena za více závislostmi provázanou architekturou (cross-layer). Aplikace tak získává větší kontrolu a umožní jí optimalizovat komunikaci. Důvodem je omezení výpočetních zdrojů senzorového uzlu. Typickými rysy jsou energetická nezávislost, nízká cena, nízká velikost a hmotnost uzlu. Logickým výsledkem je nízká výpočetní kapacita a malý rádiový dosah vysílače-přijímače. Celý komplet pak musí fungovat i v nebezpečném prostředí (např. detekce požáru). Je zjevné, že realizace WSN není triviální úkol a na komunikační protokoly bude vyvíjen tlak, aby měly co nejmenší spotřebu energie. Jde o co nejmenší vzdálenost komunikace (spotřeba energie roste kvadraticky se vzdáleností). Zavádí se technika víceskokové komunikace a předzpracování (preprocessing) dat. Na obr. 1.1 je znázorněno základní struktura WSN. Schéma naznačuje, že WSN je distribuovaným systémem, kde uzly musí spolupracovat k dosažení společného cíle. Návrhář lokačního protokolu musí řešit omezení ve spotřebě energie, škálovatelnost (uzlů může být deset i deset tisíc), přesnost, cenu, chybovost.

Automatická detekce lokace - lokalizace - je důležitým prvkem aplikací vyžadující geografickou znalost pozice uzlu. Příkladem může být náhodné rozmístění uzlů po jejich plošném roznesení letadlem nebo pro mobilní uzly měnící svoji polohu. Aktuální platná poloha může být nutná pro interpretaci nasnímaných dat či pro směrovací protokoly založených na poloze. Zachycená událost v síti může být definována jako čtveřice (časové razítko, fyzická pozice, adresa, data). Časové razítko implikuje časovou synchronizaci uzlů v síti, fyzická pozice lokačního protokolu, adresa adresovací schéma a data kódování. Tyto požadavky by měla splnit WSN síť používající ZigBee ke komunikaci.

Práce je následovně členěna do kapitol:

1. Bezdrátové senzorové sítě
2. ZigBee
3. Analýza aktuálního stavu problematiky
4. Signály v síti ZigBee
5. Měření vzdáleností a úhlů mezi uzly
6. Lokalizace uzlu v síti

# 1 Bezdrátové senzorové sítě

Tato kapitola je teoretickým úvodem do bezdrátových senzorových sítí. Bezdrátové senzorové sítě svými vlastnostmi odpovídají síti typu ad-hoc. Následující kapitoly zasazují WSN do kontextu s ostatními ad-hoc sítěmi a poskytují tak vhodný přehled.

## 1.1 Síť typu ad-hoc

Základní myšlenkou ad-hoc sítí je decentralizovaně vytvořená síť, kde komunikace není řízena žádným centrálním uzlem a spoje mezi uzly jsou dočasně vytvořeny za účelem splnit okamžitou potřebu komunikace. Tento typ komunikace je nazýván „rovný s rovným“ (peer-to-peer). Zmíněný princip decentralizovaných ad-hoc sítí byl úspěšně aplikován v systému Aloha na Havajské univerzitě v roce 1970. Byly aplikovány koncepty protokolů pro náhodný přístup k přenosovému médiu. Aloha je založena na principech jednoskokové (single-hop) výměny paketů. V roce 1973 agentura DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) zadala projekt s názvem PRNET (Packet Radio Network). Cílem projektu byla rádiová komunikace s mechanismem přepínání paketů, zajišťujících spolehlivou komunikaci mezi mobilními uzly a terminály. Projekt realizoval víceskokový přenos (multi-hop) umožňující komunikaci na větší vzdálenosti. Projekt byl úspěšný a představil další principy dnes běžně používané, jako je management toku v síti či kontroly chyb. Fyzické řešení sítě omezovalo velikost sítě do 138 uzlů. Toto omezení znamenalo, že se nevyskytla potřeba studovat otázku bezpečnosti či nasazení sítě pro sběr dat, monitorování. V roce 1983 sponzorovala agentura projekt s názvem SURAN (Survivable Radio Network). Cílem projektu bylo odstranit zmíněné omezení a vyvinout tak malé, levné, energeticky nenáročné radiozařízení s menším dosahem, které podporuje sofistikovanější protokoly pro šíření informací v síti. Hlavní důraz byl kladen na škálovatelnost, bezpečnost a robustnost sítě. Bylo nutné vyvinout nové algoritmy, které byly schopny obstát v síti v řádu tisíce uzlů. Výsledkem projektu byly rádiové směrovače (packet radios) tvořící síť MANet (mobile ad-hoc network). MANet je typ ad-hoc bezdrátové sítě se schopností automatické konfigurace. Rádiové směrovače se mohou pohybovat v prostoru, vytvářet bezdrátové spojení. Topologie sítě je značně dynamická. Ovšem k nasazení většího počtu uzlů k monitorovacím účelům překážela stále jejich pořizovací cena a technologické omezení „hardware“.

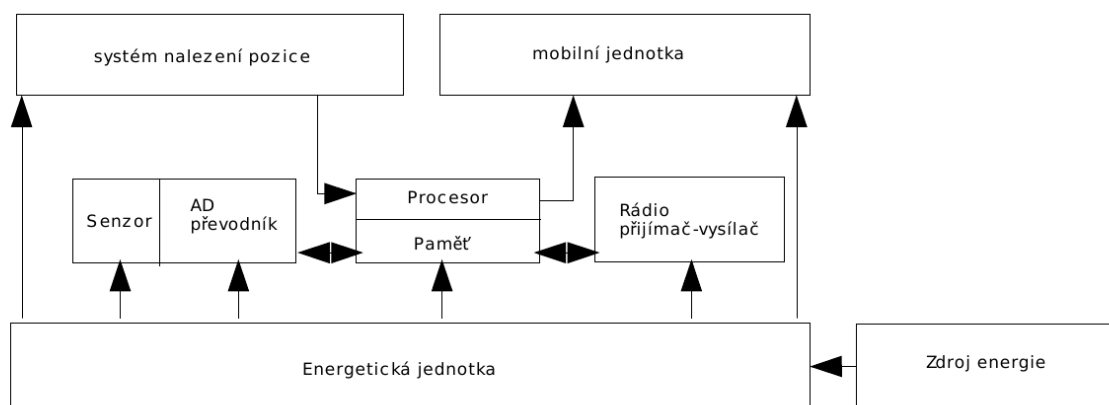
Bezdrátové ad-hoc sítě mohou být dále klasifikovány.

- mobilní ad-hoc síť MANet (Mobile Ad-hoc Network)
  - dopravní ad-hoc síť VANet (Vehicular Ad-hoc Networks)
  - inteligentní dopravní ad-hoc síť InVANet (Intelligent Vehicular Ad-hoc Network)
- bezdrátové samoorganizující se síť WMN (Wireless Mesh Network)
- bezdrátové senzorové síť WSN (wireless sensor network)

## 1.2 Bezdrátové senzorové síť

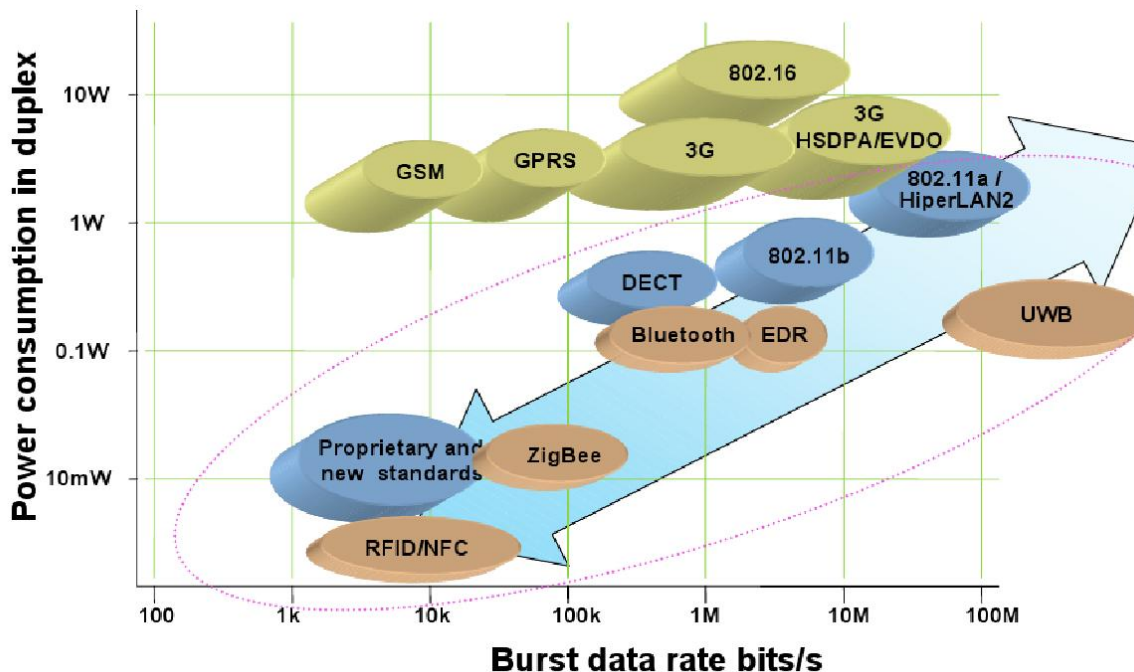
WSN sítě byly navrženy pro účely monitorování fyzikálních jevů a řízení procesů pomocí senzorů umístěných na uzlu. Základním principem je proces detekce událostí (jevů), sběr a zpracování dat uzlem. Následuje přenos dat k zájemci. WSN síť teoreticky mohou tvořit velké množství uzlů v řádu až tisíců a jedné základní stanice (ZS, Base Station, sink). Uzly pak kooperativně šíří data směrem k základní stanici, která je ukládá do paměti a zpřístupňuje je uživatelům např. přes Internet. Základními požadavky jsou nenáročná nasazení, udržování sítě, schopnost adaptace na aktuální topologii a dle aplikace omezení zdrojů pro uzly.

Úspěch nasazení WSN je kriticky závislý jak na návrhu „hardware“ tak na protokolové výbavě uzlu. WSN se často používají pro měření v rizikových oblastech, kde by konvenční metody měření byly nákladné či ohrožovaly zdraví obsluhy zařízení. Požadavky na „hardware“ vedly k miniaturizaci uzlů, k efektivnímu využití zdrojů a k nízké výrobní ceně. Velikost uzlů se odvíjí od aplikace. Uzly jsou napájeny ze své vlastní baterie. Neočekává se obsluha uzlů a výměna baterií. Je nutné proto na všech úrovních (hardware, software) zajistit efektivní využití energie. Tento faktor je zásadní pro spolehlivost a životnost celé sítě. Další omezení, vyplývající z požadavků na nízkou cenu a jednoduchost uzlu, jsou dostupná paměť a výpočetní síla. Vyjmenovaná omezení jsou předmětem výzkumů a optimalizací při návrhu „hardware“ a komunikačních protokolů, zvláště pak směrovacích a řízení přístupu k přenosovému médiumu MAC (Medium Access Control).



Obrázek 1.1 Obecné schéma uzlu. [2]

Obrázek 1.1 ukazuje základní schéma uzlu v síti WSN. Cílem této práce je analýza a návrh řešení pro modul systému nalezení pozice za použití technologie ZigBee. Obrázek 1.2 ukazuje expanzi bezdrátových technologií nejen k vyšším přenosovým rychlostem, ale také k technologiím s nižším výkonem a přenosovou rychlostí.



Obrázek 1.2: Přehled bezdrátových technologií. [4]

### 1.3 Aplikace ve WSN

Odhad lokace je proces získání informace o fyzické poloze vzhledem k uzlům, mající přesnou znalost své polohy tzv. pevné uzly. Příkladem aplikace se znalostí fyzické pozice může být návštěvník muzea s audio/video nahrávkami průvodce. Přehrávání může být pak řízeno fyzickou polohou návštěvníka v muzeu. Dalším příkladem je vylepšení zabezpečení na základě polohy. WSN aplikace [2] lze rozlišit dle povahy aplikace na typ periodického měření, kdy data z uzlů jsou periodicky odesílána do základní stanice. Dalším typem je detekce událostí. Jakmile uzel detekuje signál, který překročí definovaný práh nebo v případě složené události uzly rozhodnou o detekci a okamžitě jej odešlou základní stanici. Třetím typem aplikace WSN je sledování (tracking). Kooperující uzly určí polohu cíle, rychlost či směr pohybu. Posledním typem je aproximace funkce a detekce hran. Na základě dat sesbíraných v základní stanici je možné vytvořit např. Mapu (funkci) závislosti fyzikální veličiny na poloze. Nepokryté plochy uzlů je pak možné aproximovat (např. teplotní mapa). Detekce hran představuje problém nalezení oblasti či bodů o stejné hodnotě. V příkladě teplotní mapy bude požár definován svými hranicemi.

Kategorizace aplikací dle [3] :

- **kategorie**

**charakteristiky:** rádiová víceskoková konektivita, dynamické směrování, větší toky dat, “multipoint-to-point“ komunikace, samoorganizující se systémy, velký počet uzlů v síti

**aplikace:** monitorování (životní prostředí), národní bezpečnostní systém, armádní aplikace

- **kategorie**

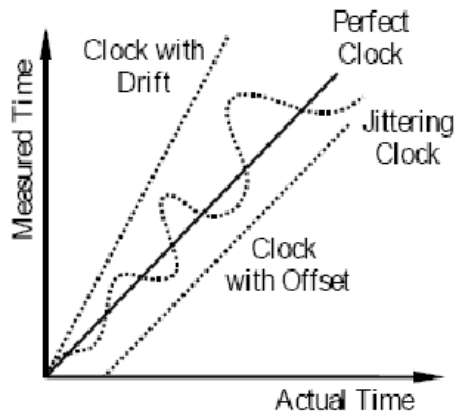
**charakteristiky:** point-to-point (point-to-sink) komunikace, statické směrování, rádiová jednoskoková konektivita, menší prostory (domácnost, výrobní hala, lidské tělo)

**aplikace:** domácí řídicí systém (inteligentní dům), RFID (radio-frequency identification) systémy, vypínače osvětlení, bezpečnostní systémy (detektor kouře, termostat)

V následujícím odstavci se věnuji praktickým aplikacím WSN. Aplikace zahrnuté do oblasti inteligentního domu jsou např. automatické řízení již existujících systémů (rozvodů tepla, vody, elektřiny atd.) za účelem úspory energií, zvýšení pohodlí a bezpečí. Dále může poskytovat detailní či agregované informace o spotřebě energií. Armádní aplikace a bezpečnostní monitorování oblasti jsou další vhodné aplikace. WSN může nahradit ostrahu určité oblasti - problém lokalizace a identifikace přátelských/nepřátelských jednotek. Další aplikace jsou např. automatizace v průmyslu a řízení procesů, distribuovaná databáze (Oracle), monitorování seizmických otřesů, řízení letecké přepravy, monitorování životních funkcí (vzdálený sběr fyzických dat), inteligentní prostor (domácnosti, budovy, kancelář). Aplikací je opravdu velká řada, která předurčuje značné rozšíření WSN do běžného života.

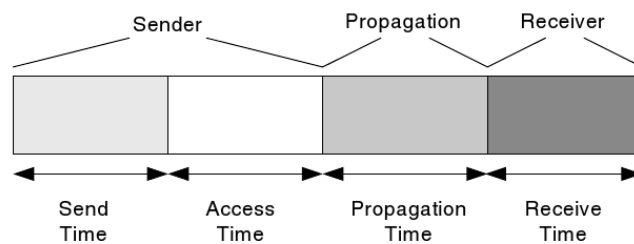
## 1.4 Časová synchronizace uzlů ve WSN

Synchronizace uzlů je důležitá nejen v lokalizaci objektu, ale i v problému difúze dat (agregace dat) nebo v koordinované akci více uzlů. Synchronizace času zasahuje do více vrstev ZigBee - koordinace probouzení a usnutí uzlů, TDMA (Time Division Multiplex) plán atd. Pro monitorovací aplikace je typické, že více senzorů zachytí stejný jev. Časová synchronizace pak zajistí, že se bude k základnové stanici sítí přenášet pouze jeden výskyt jevu místo více duplicitních. Na obr. 1.3 jsou zachyceny možné chyby hodin vzhledem k referenčním hodinám – posunutí (offset), odchylka (drift) a kolísání (jitter).



Obrázek 1.3: Měření času a chyby hodin. [23]

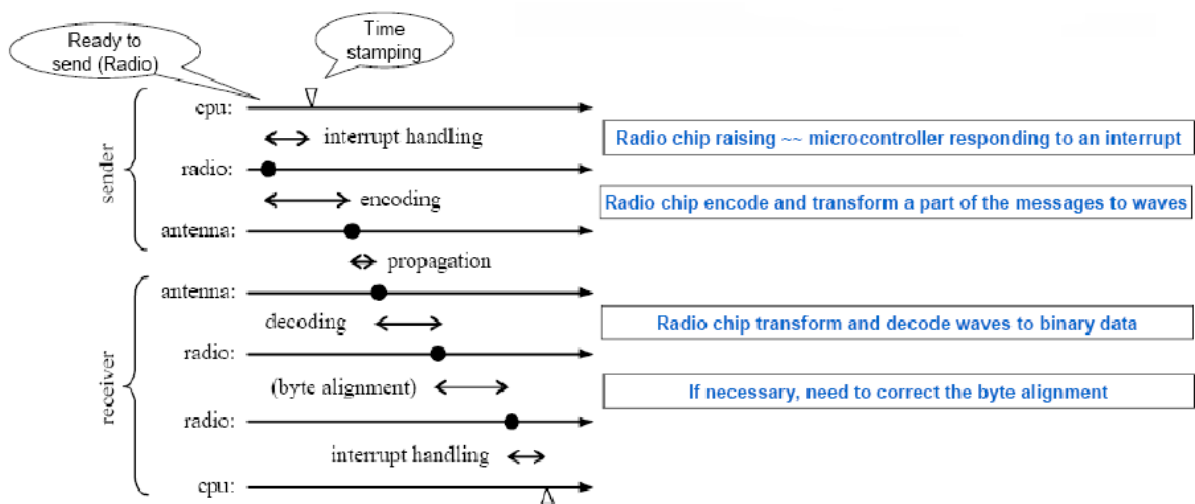
Téměř všechny protokoly synchronizace času jsou založeny na výměně zpráv mezi uzly. Je několik typů zpoždění zprávy (viz. obr. 1.4 a obr. 1.5) - doba vytvoření paketu, doba přístupu na kanál, doba přenosu a doba příjmu. Doba vytvoření paketu zahrnuje čas zpracování mikrokontrolérem a vystavení paketu na síťové rozhraní. Doba přístupu na přenosový kanál zahrnuje zpoždění na MAC (Medium Access Control) a na fyzické vrstvě (výpočet kontrolního součtu FCS (Forward Control Sum), modulace). Doba přenosu pak zahrnuje zpoždění šíření signálu na přenosovém médiu a případné zpoždění při směřování a přepínání v mezilehlých uzlech. Doba příjmu je pak doba zpracování paketu na straně příjemce. Tato doba zahrnuje inverzní operace k zaslání paketu - demodulace, tvorba rámce, ověření kontrolního součtu a čas zpracování mikrokontrolérem. Obrázek 1.5 znázorňuje výše popsaný postup graficky v sekvenčním diagramu.



Obrázek 1.4: Zpoždění paketu v časové synchronizaci. [23]

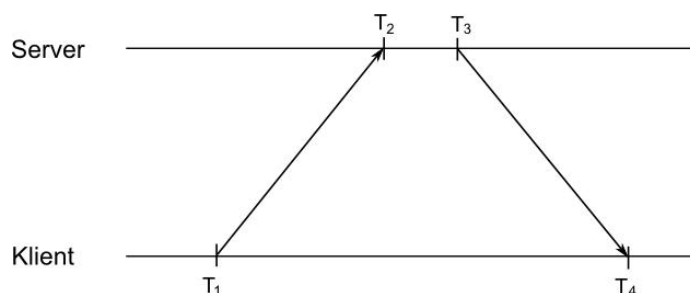
Následuje popis metrik pro vyhodnocení synchronizačních protokolů:

- **dostupnost a rozsah.** Síť uzlů může být synchronizovaná globálně nebo lokálně v jednotlivých oblastech. Globální synchronizace je nákladná na zdroje a lokální synchronizace může stačit na požadavky aplikace. Dostupnost je definovaná jako úplnost pokrytí protokolu v oblasti.
- **cena a efektivnost.** Protokol musí respektovat omezení WSN uzlu na zdroje. GPS přijímač není vhodný.
- **přesnost.** Úroveň přesnosti je obecně podmíněna požadavky aplikace.



Obrázek 1.5: Zdroje chyb časové synchronizace. [24]

Základní myšlenka časové synchronizace je následující. Server periodicky zasílá svůj čas klientům a ti se na základě požadované přesnosti rozhodují. Pokud zpoždění vyhovuje požadované přesnosti, upraví klient svoje hodiny podle hodin serveru. Pokud zpoždění přenosu nesplňuje přesnost, klient postupuje následovně. Klient pošle požadavek serveru na časovou synchronizaci a připojí časovou známku  $T_1$  odeslání paketu. Server paket přijme a připojí časovou známku  $T_2$ , zpracuje a zasílá odpověď klientovi s připojenou časovou známkou  $T_3$ . Klient paket přijme a připojí čas  $T_4$  dle obrázku 1.6.



Obrázek 1.6: Základní myšlenka časové synchronizace. [23]

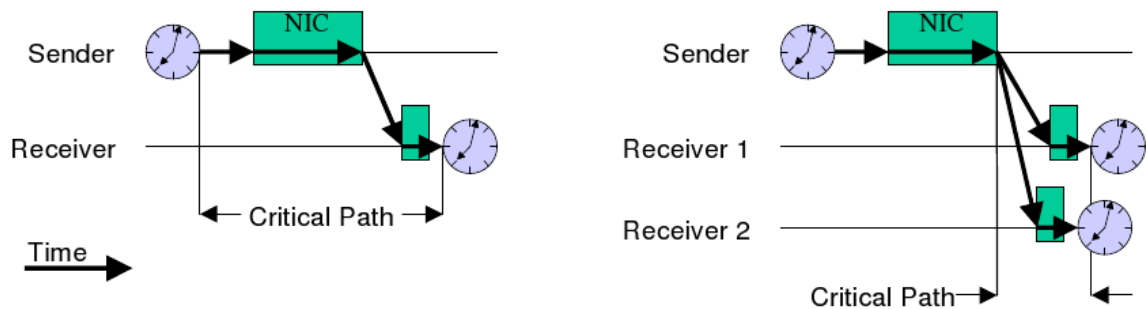
Korekce času - rozdíl času klienta od času serveru - lze pak spočítat dle vzorce 1.1

$$\tau = T_3 - T_4 - \delta \quad [\text{s}] \quad (1.1)$$

$$\delta = \frac{(T_4 - T_1) - (T_3 - T_2)}{2} \quad [\text{s}] \quad (1.2)$$

,kde  $\delta$  je zpoždění přenosu v jednom směru. Bohužel  $\delta$  je zdrojem chyby, protože zpoždění přenosů v obou směrech nebudou nikdy zcela shodná. Důsledkem zjištěných faktů je výzkum nových protokolů, které omezují vliv nedeterminismu synchronizačních chyb a zvyšující přesnost synchronizace.

V tomto odstavci je představen vhodný protokol pro ZigBee senzorové sítě. Cílem synchronizačních metod je snížení počtu zdrojů chyb a jejich vliv na synchronizaci. Autor práce [24] představil nový protokol RBS (Reference Broadcast Synchronization) a myšlenku synchronizace hodin až ve chvíli, kdy je jí třeba (post de-facto synchronization). Obrázek 1.7 ukazuje kritickou cestu v základní metodě synchronizace a v RBS. Základní metoda synchronizuje hodiny přijímače s hodinami vysílače. Protokol RBS synchronizuje pouze přijímače mezi sebou a vysílač svým všesměrovým vysíláním (broadcast) poskytuje jen referenční impulz.



Obrázek 1.7: Kritická cesta tradičního protokolu a cesta protokolu RBS. [24]

#### Algoritmus:

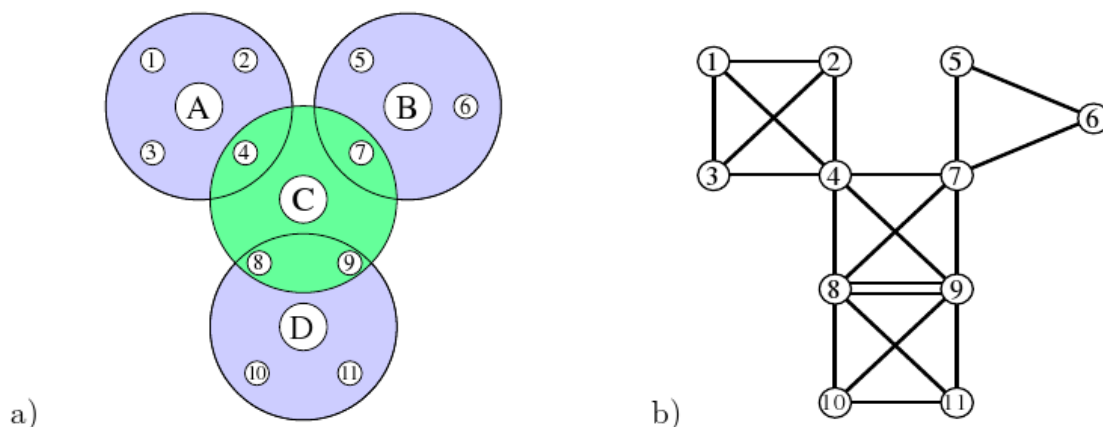
1. vysílač vysílá „broadcast“  $n$  referenčních paketů
2. každý přijímač přiřadí lokální čas referenčnímu paketu podle svých hodin
3. přijímače si vymění svá měření
4. přijímač  $i$  aproximuje lineární funkci převodu lokálních hodin na hodiny přijímače  $j$  na základě posunutí (offset) a odchylky (drift) hodin přijímače  $j$  od lokálních hodin

Algoritmus vyžaduje, aby všechny uzly byly v jedné „broadcast“ doméně. Pak každý uzel je schopný převést svůj lokální čas na čas kteréhokoliv jiného uzlu. V praxi je však běžný víceskokový přenos. Pokud je jeden uzel součástí více „broadcast“ domén, může sloužit jako převodník mezi těmito „broadcast“ doménami.

Ukázkový příklad: Úkolem je porovnat časy detekce jevů  $E'_1$  v uzlu 1 a  $E''_{10}$  v uzlu 10 v topologii z obrázku 1.8 a zjistit, jestli se nejedná o ten samý jev. Tedy jestli  $E'_1(T_1) == E''_{10}(T_{10})$ . Proveďte se následující převod (1.3), po kterém lze přímo porovnat časová razítka událostí.

$$E'_1(T_1) \Rightarrow E'_1(T_4) \Rightarrow E'_1(T_8) \Rightarrow E'_1(T_{10}) \quad (1.3)$$

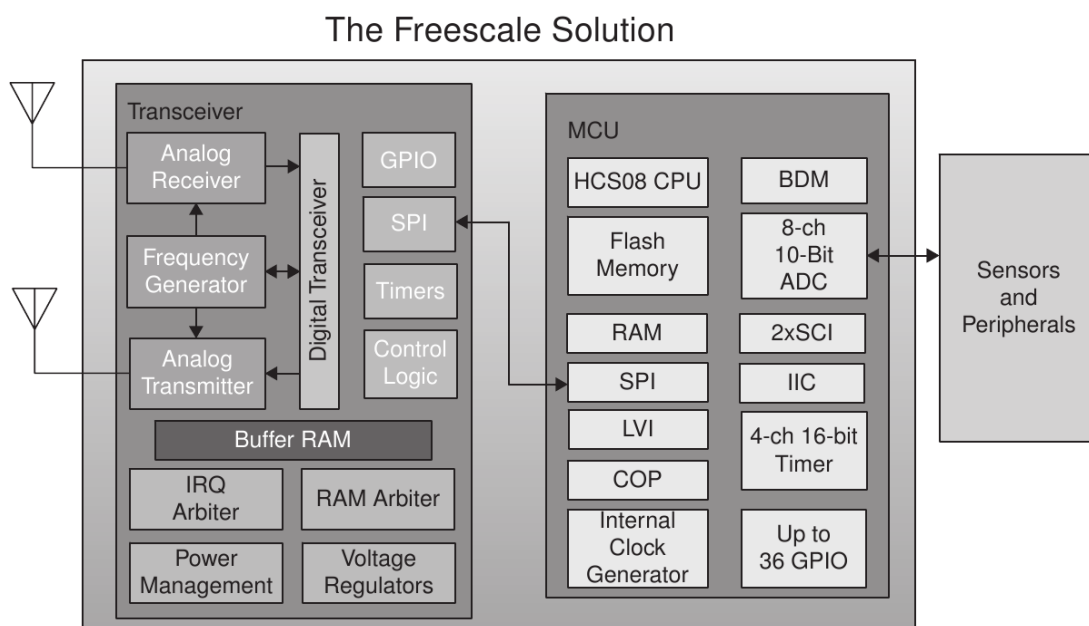




Obrázek 1.8: (a) Fyzická topologie sítě o čtyřech „broadcast“ doménách (b) logická topologie [24]

## 2 ZigBee

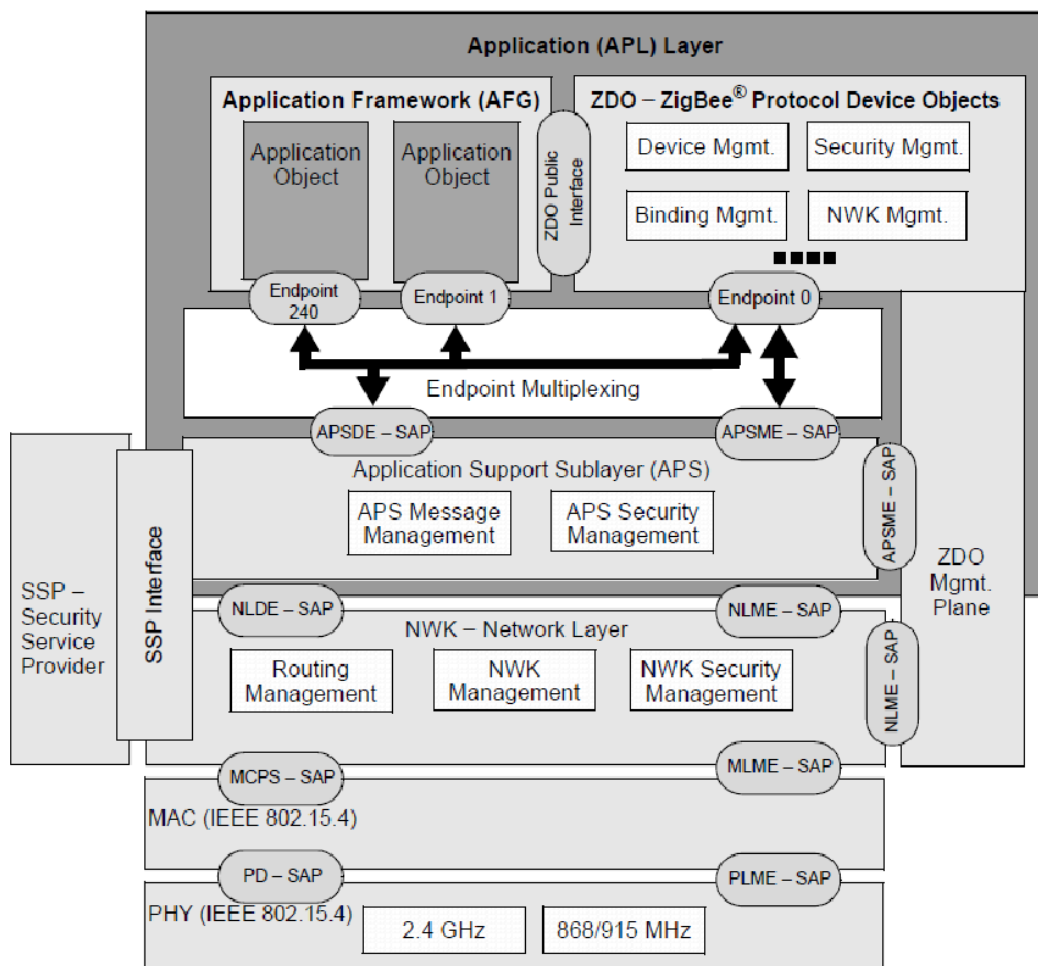
Tato kapitola popisuje koncepty technologie ZigBee a IEEE 802.15.4 s ohledem na řešení lokalizace. ZigBee se zařazuje svými vlastnostmi do typu LR-WPAN (Low Rate-Wireless Personal Area Network). Předmět lokalizace požaduje pochopení hlavně fyzické vrstvy. Vyšší vrstvy v ZigBee zabezpečují podporu pro realizaci lokalizačních protokolů. Obr. 2.1 ukazuje typickou implementaci ZigBee zařízení. Mikrokontrolér je připojen k ZigBee vysílači-přijímači (transceiver) přes sériovou sběrnici SPI (Serial Peripheral Interface). ZigBee rozhraní (stack) je relativně malé. Plná velikost rozhraní je cca 32KB, redukováná verze pak cca 16KB v 8 bitovém mikrokódu.



Obrázek 2.1 Obecné schéma uzlu od firmy Freescale. [1]

## 2.1 Architektura

Na obrázku 2.2 je architektura uzlu ZigBee sítě. ZigBee využívá vrstev definovaných standardem IEEE 802.15.4 pro fyzickou vrstvu PHY (Physical layer) a linkovou vrstvu resp. podvrstvu vícenásobného přístupu na sdílené médium MAC (Medium Access Control). Tyto vrstvy poskytují služby spolehlivého přenosu bitového proudu mezi svými sousedy (single-hop). Vyšší vrstvy architektury definuje skupina ZigBee Alliance a přidává služby síťové, aplikační vrstvy s podporou pro bezpečnou komunikaci SSP (Security Service Provider). Vrstvy komunikují použitím rozhraní v bodě přístupu ke službě SAP (Service Access Point), která poskytuje přístup k atributům vrstvy a umožňuje tak výměnu datových jednotek protokolu PDU (Protocol Data unit) i správu vrstvy.



Obrázek 2.2: Architektura ZigBee [5]

## 2.2 Fyzická vrstva

Protokol fyzické vrstvy standardu IEEE 802.15.4 realizuje kromě modulace/demodulace rámců na rádiové signály i skenování dostupných kanálů a jejich dynamický výběr. Další služby jsou pak detekce výkonu signálu a kvality linky.

Vrstva poskytuje vyšší MAC vrstvě služby:

- **nastavení akčního stavu přijímače-vysílače (transciever)**. Možné stavy jsou vypnut a vysílání, příjem a spánek.
- **detekce energie (Energy Detection)**. Změření výkonu přijímaného signálu.
- **detekce kvality linky (Link Quality Indicator)**. Výpočet poměru výkon signálu a šumu (SNR, signal to noise ratio).
- **zjištění volného kanálu (Clear Channel Assesment)**.

Přenosová pásma dle standardu (viz. obr. 2.3):

### ISM 2,4 GHz

- 16 kanálů (11-26) po 5 MHz, přenosová rychlost 250 kb/s, definováno globálně
- $F_c = 2405 + 5(k - 11)$  [MHz]  $k = 11, 12, \dots, 20$

### 915 MHz

- 10 kanálů (1-10), přenosová rychlost 40 kb/s, definováno pro Severní Ameriku
- $F_c = 906 + 2(k - 1)$  [MHz]  $k = 1, 2, \dots, 10$

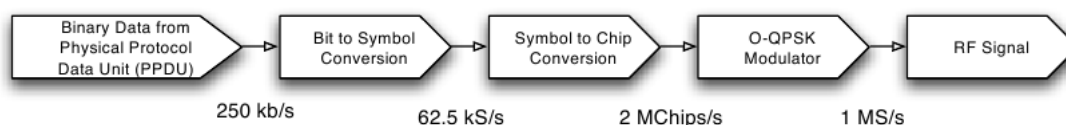
### 868 MHz

- 1 kanál (0), přenosová rychlost 20 kb/s, definováno pro Evropu
- $F_c = 863,3$  [MHz]  $k = 0$

	Frequency (MHz)	Number of Channels	Modulation	Chip Rate (Kchip/s)	Bit Rate (Kb/s)	Symbol Rate (Ksymbol/s)	Spreading Method
	868-868.6	1	BPSK	300	20	20	Binary DSSS
	902-928	10	BPSK	600	40	40	Binary DSSS
Optional	868-868.6	1	ASK	400	250	12.5	20-bit PSSS
	902-928	10	ASK	1600	250	50	5-bit PSSS
Optional	868-868.6	1	O-QPSK	400	100	25	16-array orthogonal
	902-928	10	O-QPSK	1000	250	62.5	16-array orthogonal
	2400-2483.5	16	O-QPSK	2000	250	62.5	16-array orthogonal

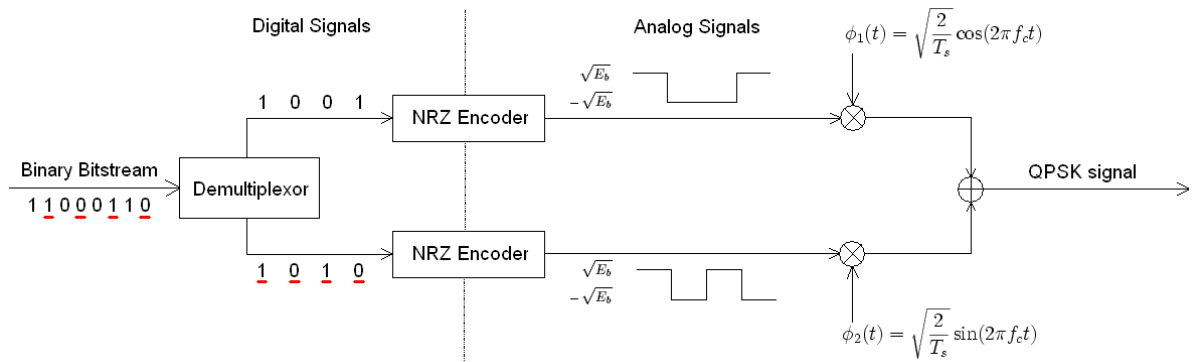
Tabulka 2.3 Frekvenční plán [7]

Následující část se věnuje fyzickému přenosu dat mezi uzly. Obrázek 2.4 ukazuje převod bitů rámce fyzické vrstvy PPDU (Physical Protocol Data Unit) na rádiový signál pro variantu v pásmu 2,4 GHz.



Obrázek 2.4 Řetěz převodu bitů z fyzického rámce na rádiový signál. [6]

Celý řetěz se provede následovně. Čtyři bity rámce se převedou na jeden symbol. Tedy pro 250 kb/s platí symbolová rychlost 62,5 kS/s. Každý symbol podstupuje přímé rozprostření na základě přímé sekvence pseudo-náhodného kódu (DSSS, Direct Sequence Spread Spectrum) na 32 čipů (chip). Ve vyhledávací tabulce je 16 pseudo-náhodných ortogonálních sekvencí. Tedy pro jeden datový bit připadá 8 čipů. Výsledkem je čipová rychlost  $8 * 250 \text{ kb/s} = 2 \text{ Mchips/s}$ . Poslední a nejdůležitější fáze je vlastní modulace. Dle tabulky 2.4 je pro variantu pásma 2,4 GHz dle standardu přiřazena modulace posunuté kvadraturní fázové klíčování O-QPSK (Offset-Quadrature Phase Shift Keying). Výstupem je modulační rychlost 1MS/s. Znalost činností této modulace je zásadní pro zpracování signálu v pozdějších kapitolách. Princip je schématicky zobrazen na obrázku 2.5.

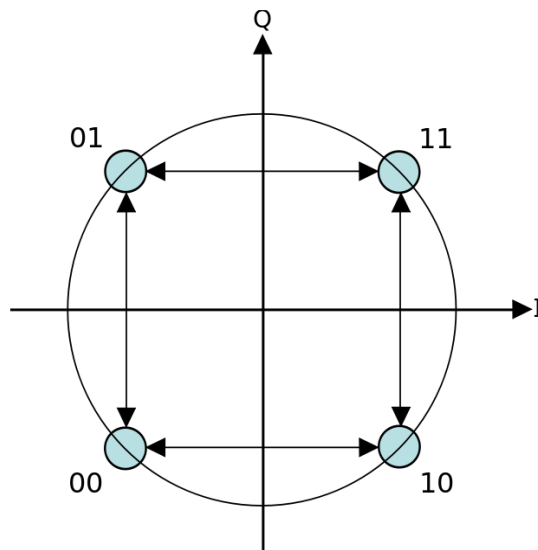


Obrázek 2.5 Schéma principu modulace O-PSK. [9]

O-PSK je digitální modulace kódující symbol nastavením změny fáze nosného signálu o  $\pm 90^\circ$ . Symbol představuje zakódované bity. Princip kódování je vidět z obrázku 2.6. Fáze symbolů jsou vyneseny ve fázovém digramu známém jako konstelační diagram, kde každou fázi lze rozložit do složek kosinus (I, in-phase) a sinus (Q, Quadrature). Modulovaný signál lze pak zapsat [9] dle (2.1):

$$s_{Tn}(t) = U (\pm \cos(2\pi f_n t + \varphi) \pm \sin(2\pi f_n t + \varphi)) \quad (2.1)$$

, kde  $U = \pm \sqrt{\frac{2E_b}{T_c}}$  a  $E_b$  je energie na bit



Obrázek 2.6 Konstelační diagram modulace O-PSK. [9]

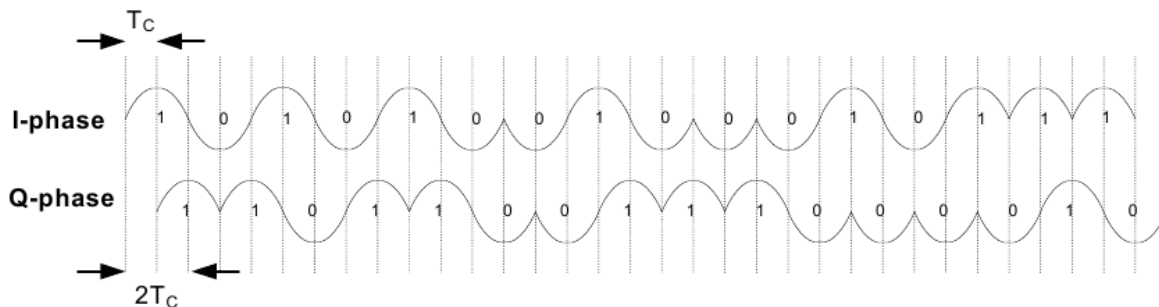
Vstupem do digitální modulace O-PSK je proud bitů. V případě 802.15.4 se jedná o proud čipů. Demultiplexor rozdělí liché a sudé bity do dvou posloupností. Dalším krokem je kódování Bez návratu k nule (NRZ, Non Return to Zero) a vygenerované obdélníkové signály s následujícím kódování (2.2):

$$\begin{cases} +\sqrt{E_b} & \text{pro binární „1“} \\ -\sqrt{E_b} & \text{pro binární „0“} \end{cases} \quad (2.2)$$

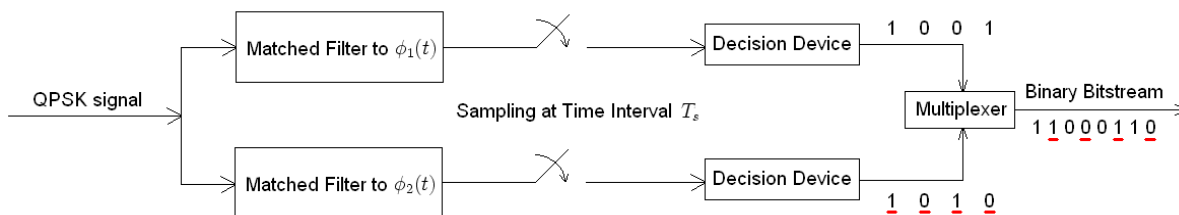
Vygenerované signály jsou vynásobeny nosným signálem o frekvenci  $f_c$  a je provedena superpozice. Výsledný signál je zesílen a přiveden na anténu.

Příklad:

Symbol o čtyřech bitech 0000 je převede na PN sekvenci 11011001110000110101001000101110, kde  $T_c = \frac{1}{2 \cdot 10^6} = 0,5 \mu s$  je doba jednoho čipu. Obrázek 2.7 ukazuje dva signály před superpozicí.



Obrázek 2.7 Příklad modulace O-PSK [8]



Obrázek 2.8 Schéma demodulace O-PSK [9]

Demodulace O-PSK signálu dle obr. 2.8 je následující. Modul „Matched filter“ plní funkci korelačního filtru nad  $\Phi_1$  resp.  $\Phi_2$ . Rozhodovací jednotka (Decision Device) provede při vzorkovací periodě symbolu  $T_c$  rozhodnutí o mapování signálu na binární 0 či 1. Multiplexer provede sjednocení binárních hodnot do binárního proudu, který je vstupem do rekonstrukce rámce ve fyzické vrstvě včetně ověření kontrolního součtu FCS (Forward Control Sum).

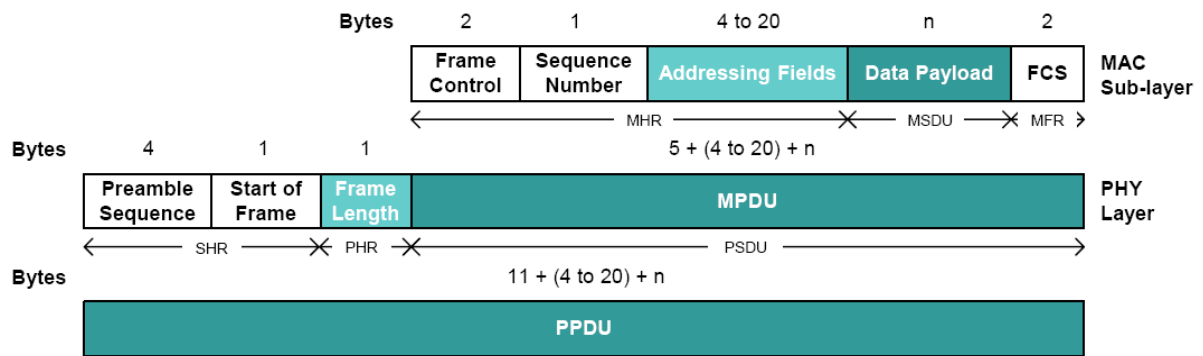
Citlivost přijímače IEEE 802.15.4 standard definuje citlivost přijímače jako nejnižší úroveň signálu, při které je chyba paketu (PER, Packet Error Rate) nižší než 1%. Standard dále vyžaduje citlivost -85 dBm pro pásma 2.4 GHz a 868/915 MHz. Pro pásmo 868/915 MHz je vyžadována citlivost -92 dBm, pokud je použita modulace BPSK (Binary Phase Shift Keying). Výkon vysílače se pohybuje v rozmezí 0dBm až +20dBm (+4dBm je běžné) a dosah signálu 20 až 100 m. ZigBee pracuje v bezlicenčním pásmu 2,4 GHz ISM. V tomto pásmu pracují i jiné bezdrátové sítě: Wifi (802.11 b/g), BlueTooth, mikrovlnné trouby apod. Každá síť pracující v tomto pásmu musí být robustní k interferenci od ostatních sítí.

Koexistence sítě je definována jako schopnost pracovat v blízkosti jiných bezdrátových zařízení. IEEE vytvořila skupinu IEEE 802.19, která spravuje pravidla koexistence IEEE 802 standardů. Existují dva přístupy koexistence sítí - kolaborativní a nekolaborativní. Kolaborativní předpokládá spolupráci mezi sítěmi a vzájemnou dohodu o neblokaci přenosů (střídáním aktivních a neaktivních dob použitím TDMA). Nekolaborativní pak nemá žádnou znalost o okolních sítích. ZigBee používá metodu CSMA/CA (Collision Sense Multiple Access / Collision Avoidance) v nekolaborativním prostředí. Metoda je zahájena před každým datovým přenosem. ZigBee má typicky velmi nízkou pracovní dobu (duty cycle, střída) a vysílací výkon včetně zisku antény (0 dBm). Ostatní sítě jako Wifi a Bluetooth mohou mít problém zachytit interferenci od ZigBee a upravit svůj frekvenční kanál apod. Zařízení IEEE 802.11 b/g má typický vysílací výkon mezi 12 - 18 dBm, ale může mít i 30 dBm. Šířka přenosového pásma signálu Wifi po rozprostření DSSS má 22 MHz (ZigBee 2 MHz). Wifi má dále 14 překrývajících kanálů, a z nich 3 nepřekrývající kanály (USA 1, 6, 11 a EU 1, 7, 13). Při využití nepřekrývajících kanálů Wifi lze nalézt kanály ZigBee 15, 20, 25 a 26 v mezerách mezi těmito kanály (guard bands). Pro ZigBee se stále nejedná o ideální situaci, ale interference od Wifi se radikálně sníží. ZigBee dále může zaznamenat silnou interferenci do Bluetooth, jehož vysílací úroveň signálu může mít i 20 dBm. Šířka pásma Bluetooth je 1 MHz (ZigBee 2 MHz) a má 79 kanálů. Kolizní kanály v Bluetooth jsou tři. Bluetooth používá frekvenční skoky v rozprostřeném spektru (FHSS, Frequency Hopping Spread Spectrum) a za adaptabilní formy (AFH, Adaptive FHSS) dokáže označit interferované kanály a nahradí je jinými. Při nepoužití AFH dojde nejvýše k 4% kolizí (3 z 79 hopů \* 100 %). Dalším zdrojem interference mohou být mikrovlnné trouby. Pracují běžně na frekvencích 2450 MHz a šířka pásma je 20 - 80 MHz. Mikrovlnná trouba má nejvíce úniků ze vstupních dvířek a dosahují úrovně signálu -5 - 20 dBm s šířkou pásma i nad 3 MHz. Tím se stává potenciálním zdrojem interference pro ZigBee síť. Na druhou stranu u nekomerčních trub je pracovní doba (duty cycle) kolem 50 % pracovní periody a pro ZigBee by měla být neaktivní doba dostatečná pro zjištění volného kanálu CCA (clear channel assignment) a následný přenos.

## 2.3 Linková vrstva

Linková vrstva definuje čtyři typy komunikačních rámců využívaných buď pro procesy sestavení, správy nebo řízení sítě nebo přenos dat:

- Datový rámec (Data Frame) - přenos užitečné informace s délkou 104 Byte
- Potvrzovací rámec (Acknowledgement Frame) – přenos potvrzovací informace
- MAC příkazový rámec (Command Frame) – přenos konfigurace a řídicích příkazů pro centrální nastavení a řízení klientských uzlů
- Signální rámec (Beacon Frame) – synchronizace uzlů umožňující efektivní využití páňkových režimů



Obrázek 2.9 Datový rámeček [8]

Následují výpočty dob přenosu datového balíku pro přenosovou rychlost na pásnu 2,4 GHz -  $v = 250 \text{ kb/s}$ . Jejich znalost je nutná pro lokalizační metody v dalších kapitolách.

Výpočet maximální doby přenosu datového balíku z obr. 2.9:

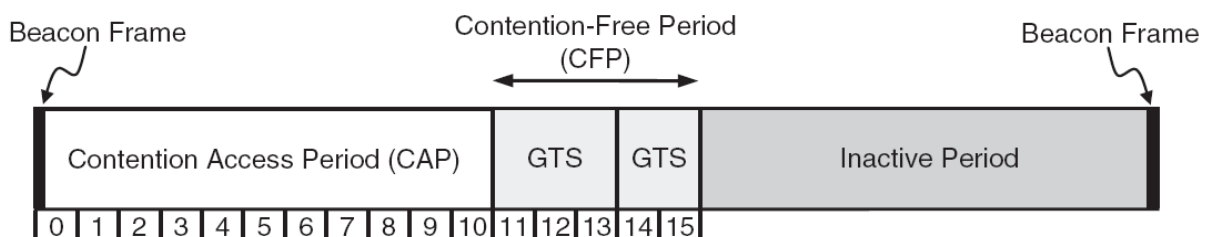
Maximální datový obsah (data payload) -  $aMaxPHYPacketSize = 127 \text{ byte}$

$$\frac{(SHR + PHR + aMaxPHYPacketSize) * 8}{250 * 1024} = \frac{(5 + 1 + 127) * 8}{250 * 1024} = 4,156 \text{ ms}$$

Výpočet minimální doby přenosu datového balíku z obr. 2.9:

$$\frac{(SHR + PHR + Frame Control + Sequence Number + Addressing Fields) * 8}{250 * 1024} = \frac{(5 + 1 + 2 + 1 + 2 + 2 + 2 + 2 + 2) * 8}{250 * 1024} = 593 \mu\text{s}$$

Synchronizace zařízení v ZigBee síti je prostředek pro řízení spotřeby koncových zařízení pomocí přechodů do spánkových režimů. Uspání zařízení je možné v intervalu od 15 ms do 15 minut. Dále je synchronizace nutná podmínka pro řízení komunikace v síti. Koordinátor vysílá na začátku každého „superrámce“ synchronizační rámeček (Beacon) podle kterého se koncová zařízení časově synchronizují. Signalizační rámeček může obsahovat adresy stanic, pro které má připravená data. Dále obsahuje identifikátor sítě PAN ID a popis struktury superrámce.



Obrázek 2.10 Superrámec [7]



Superrámec z obr. 2.10 neplní funkci paketu, deklaruje jisté časové schéma, podle kterého může probíhat komunikace. Superrámec je vymezen synchronizačními rámci (Beacon). Koordinátor rozhoduje o použití superrámce a jeho struktuře. Strukturu superrámce tvoří 16 stejných časových slotů (time slot). Koordinátor rozhodne o jejich distribuci mezi intervaly CAP a CFP:

1. Interval soutěžení o přístup k přenosovému médium (Contention Access Period, CAP) – zařízení volně soutěží o přístup metodou CSMA/CA a pak provedou své přenosy
2. Interval garantovaných časových slotů (Guaranteed Time Slots, GTS) – garantovaný kanál pro přenos; přenos dat mezi koordinátorem a koncovými stanicemi; až sedm slotů na  $N$  GTS slotů
3. Interval klidu (Inactive Period, IP) – spánkový režim nebo volná komunikace metodou CSMA/CA

Vysílání superrámce se může opakovat v rozmezí 15 ms až 252 s [15].

## 2.4 Síťová vrstva

Síťová vrstva ZigBee poskytuje připojování k síti a odpojování, zabezpečení a směrování paketů. Dále umožňuje objevování sousedních zařízení. Vrstva v koordinátoru je rozšířená o funkcionalitu přidávání adres novým zařízením v síti.

Síťová vrstva umožňuje tři komunikační mechanismy:

- Broadcast – zpráva doručena všesměrově
- Multicast – zpráva doručena členům skupiny
- Unicast – zpráva doručena pouze jednomu cíli

Uzly mohou být adresovány dlouhým (64 bitů) či krátkým (32 bitů) kódem. Síť je pak označena identifikátorem (16 bitů) PAN ID. Každou síť na daném kanálu zakládá a spravuje koordinátor. Ostatní uzly jsou koncové uzly.

Standard rozlišuje dva druhy koncového uzlu:

- Směrovač (Router)
- Koncové zařízení (End Station) – není nutná implementace síťové vrstvy

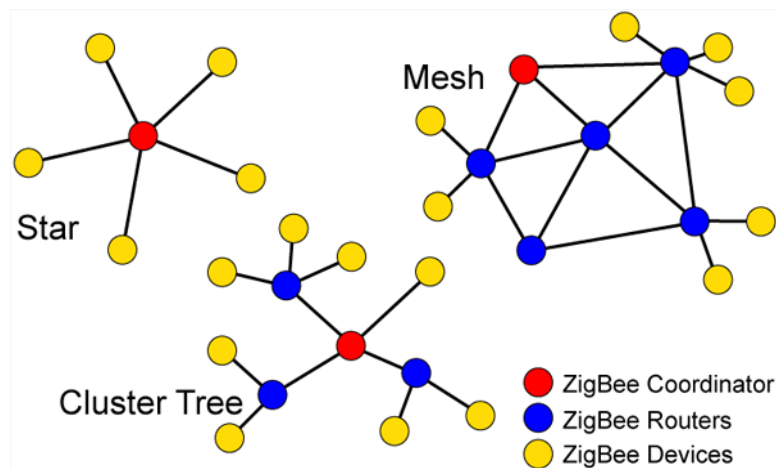
Dle úrovně funkčnosti uzlu standard rozlišuje:

- Plně funkční zařízení (Full Function Device, FFD) – koordinátor, směrovač
- Redukovaná zařízení (Reduced Function Device, RFD) – koncová stanice

Topologie sítě rozlišuje tři typy (viz. Obrázek 2.11):

- Hvězda (specifikace IEE 802.15.4)
- Síť (Mesh) (specifikace IEE 802.15.4) – Pomocí redundantních spojení mezi uzly dokáže sestavit libovolnou strukturu
- Strom (specifikace ZigBee) – základem je topologie typu Síť (Mesh) a její omezení na strukturu stromu

Každý výskyt typu topologie musí obsahovat koordinátora a libovolný počet koncových zařízení. Typy strom a síť umožňují rozšiřovat síť o nové uzly pomocí koncových zařízení v konfiguraci FFD ve funkci směrovače jako prostředníka.



Obrázek 2.11 Topologie sítě [5]

## 2.5 Aplikační vrstva

Zařízení je definováno nastaveným profilem. Profil je pak inicializované prostředí aplikací v aplikační vrstvě. Profil je dvojího druhu - veřejný, soukromý. Veřejný profil by měl zaručit přenositelnost aplikací i zařízení mezi různými výrobci. Aplikační vrstva poskytuje podporu (support sublayer) pro aplikační objekty (AO). Podvrstva poskytuje přístup k zabezpečení SSP, propojení AO a rozhraní k síťové vrstvě a mapování (binding) různých, ale kompatibilních zařízení (vypínač, lampa). Každý aplikační objekt je připojen do podvrstvy svým rozhraním - koncovým bodem EP (End Point). Koncový bod je identifikován číslem  $z < 0,255 >$ .

Předdefinované koncové body (EP):

- **EP 0** - rozhraní k ZDO (ZigBee Device Object). ZDO zprostředkovává aplikačním objektům komunikaci s vrstvami ve stacku. Tato skutečnost přímo porušuje klasický stack, kde komunikace probíhá stylem klient/server mezi sousedními vrstvami a to v závislosti vyšší vrstvy na vrstvě nižší. ZDO poskytuje možnost nastavení ZigBee zařízení pro potřeby dané aplikace a je tak nenahraditelný

- **EP 255** - rozhraní služby všesměrového vysílání (broadcast) všem aplikačním objektům
- **EP 241-254** – rezervovány

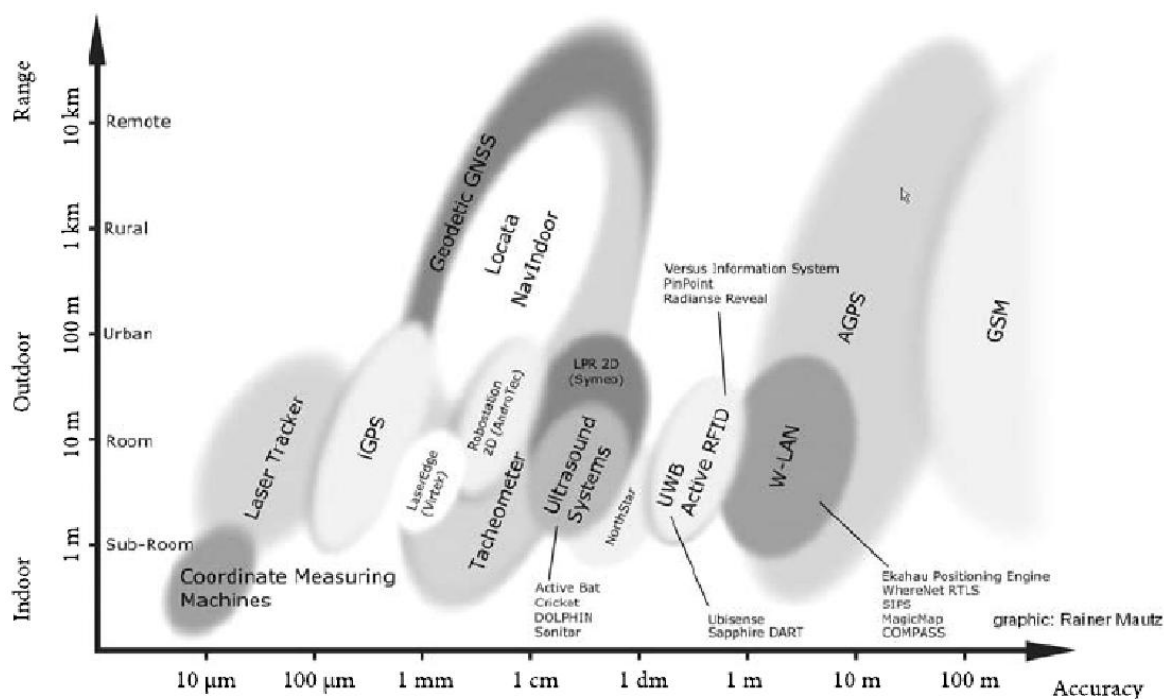
Bezpečnost SSP nabízí zabezpečení komunikace na MAC, síťové i aplikační. Míru zabezpečení definuje profil. Vrstvy sdílí stejný tajný klíč pro algoritmus AES (Advanced Encryption Standard).

### 3 Analýza aktuálního stavu problematiky

Lokační technika je klíčová pro snímání fyzického jevu, jehož interpretace by byla bez znalostí místa původu nemožná. WSN uzel je vybaven lokačním systémem. Tímto systémem může být GPS (Global Positioning systém) [10]. Tomuto řešení brání jeho cena a nefunkčnost v budovách. Proto je nutné využít algoritmy, které se obejdou bez GPS přijímače či jeho nasazení omezují na rozumný počet. Tradiční schéma těchto technik rozlišuje dvě skupiny uzlů. Uzly se znalostí absolutní polohy – pevné uzly (anchor, beacon) - a uzly používající jejich znalost k výpočtu vlastní polohy. Algoritmy se rozlišují podle techniky odhadu a měření polohy/vzdálenosti. Lokační protokoly můžeme rozdělit [11] do dvou základních kategorií: protokoly založené na výpočtu vzdálenosti a ostatní protokoly. Protokoly založené na výpočtu přímé vzdálenosti mezi sledovaným uzlem a kotvou jsou přesnější. Ostatní protokoly neměří vzdálenosti a mají tendenci být více škálovatelné, ale taky méně přesné. Mezi ostatní protokoly bych zařadil DV-HOP [12] nebo APIT[13].

Tato práce popisuje základní principy třech metod měřící vzdálenosti. První z nich používá výkon přijatého signálu RSS (Received Signal Strength), druhá využívá úhel, pod kterým byl signál přijat (AoA, signal Angel Of Arrival) a nakonec třetí metoda měří časový rozdíl příchodu signálu (ToA, Time Of Arrival) od více uzlů, které znají svoji přesnou polohu a proměnnou rychlost vlny. Metody se liší typem vstupu do algoritmu. Příkladem implementace ToA je např. GPS. ZigBee měří RSS u každého přijatého paketu a je proto snadno dostupnou veličinou. Určení přesného času vyžaduje adekvátně přesné hodiny a nalezení úhlu vyžaduje změny v hardware a růst ceny. Existuje celá řada lokálních (LPS) a globálních lokačních systémů (GPS). Tato práce se zabývá LPS systémy. Vyjmenuji některé zástupce vyskytující se v literatuře. Na obr. 3.1 jsou tyto systémy zachyceny v širší souvislosti mezi dalšími bezdrátovými technologiemi.

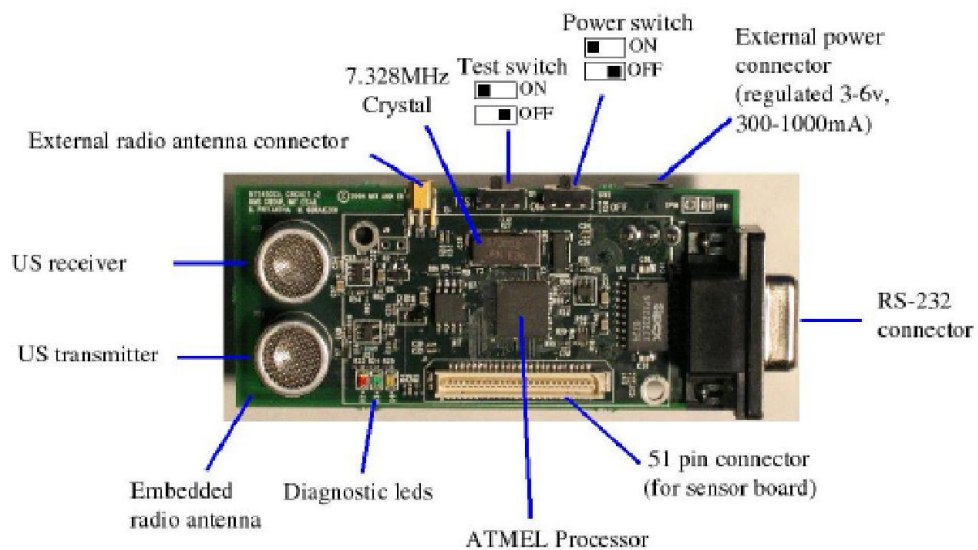
- in-building RADAR (Microsoft, RF, RSS pro odhad vzdálenosti, triangulace)
- The active Bat Location System (ultrazvuk pro odhad vzdálenosti, centralizovaný, TDOA)
- The Active Badge Location System (infračervené záření pro odhad vzdálenosti, TDOA, centralizovaný)
- Ubisense Location System (UWB pro odhad vzdálenosti, přesnost pozice 6 - 15cm, TDOA)
- Cricket (ultrazvuk pro odhad vzdálenosti, distribuovaný, DTOA, multilaterace)



Obrázek 3.1: Přehled současných lokalizačních systémů. [14]

Reálný systém lokalizace v ZigBee síti představili výzkumníci na vysoké škole MIT. Systém The Cricket je dostupný v komerční verzi a prodává je firma Xbow. Základními prvky jsou dva typy uzlů – pohyblivý uzel (Listener) a pevný uzel (Beacon) viz obr. 3.2. Jedná se o plně distribuovaný systém bez centrálního výpočetního uzlu. Oba typy jsou vybaveny přijímačem-vysílačem ultrazvuku a ZigBee (RF). Pevný uzel má pouze ZigBee vysílač a pohyblivý uzel má pouze přijímač. Pevné uzly nejsou explicitně řízeny a nevyžadují komunikaci s ostatními pevnými uzly. Pevný uzel periodicky vysílá signál RF a současně (skutečně chvíli po RF vysílání) vyšle krátký impuls ultrazvuku. Systém využívá skutečnosti, že rychlost RF elektromagnetického vlnění je řádově šestkrát rychlejší ( $300\,000\,000\text{ m/s}$  ve vakuu) než rychlost ultrazvuku ( $344\text{ m/s}$  při  $21^\circ\text{C}$ ). RF signál dorazí na přijímač dříve a spustí se čítač hodin ukončený příjmem impulsu ultrazvuku. Takto jednoduše lze získat diferenci doby přenosů signálu. Ze znalosti rychlosti obou signálů pak lze dopočítat vzdálenost uzlů.

Vlastní výpočet pozice se provádí na pohyblivém uzlu. Systém Cricket používá trilateraci. Pro zpřesnění výpočtů uzlů v pohybu je použit Kalmanův filtr. Systém Cricket nabízí uživateli tři informace - prostor, pozici a orientaci. Prostor definuje nejbližší pasivní uzel (např. laboratoř L1). Pozice je určena v lokálním souřadném systému. Tři pasivní uzly určí dvě možné  $[x, y, z]$  pozice. Jednoznačná pozice se získá ze znalosti o umístění uzlů na stropě.



Obrázek 3.2: Ukázka uzlu systému Cricket [13]

V tomto odstavci uvedu aktuální situaci v ZigBee verzování. Originální verze ZigBee standardu byla vydaná v roce 2004, druhá verze v roce 2006 a třetí, zatím konečná, v roce 2007. Verze z roku 2007 dostala komerční název ZigBee-Pro. Dle standardu 2006, 2007 nemusí zařízení splňující tyto standardy být zpětně kompatibilní se ZigBee 2004. Naopak pokud zařízení implementuje standard z roku 2007, musí být kompatibilní se ZigBee-2006. ZigBee-2006 zařízení lze zapojit do Pro sítě, ale bude vykonávat funkci pouze konečného zařízení. Rozdíl verzí 2006 a 2007 často spočívá v povinných vlastnostech, které jsou ve verzi 2006 volitelné.

## 4 Signály v síti ZigBee

Vysílací uzel (vysílač) v síti ZigBee vysílá v kanálu  $n$  v rámci jednoho symbolu signál popsáný rovnicí (4.1).

$$s_{Tn}(t) = U (\pm \cos(2\pi f_n t + \varphi) \pm \sin(2\pi f_n t + \varphi)) \quad (4.1)$$

Nosný kmitočet  $f_n$  kanálu  $n$  se vyjádří vztahem (4.1a), kde  $\Delta f$  je kmitočtový odstup mezi kanály.

$$f_n = f_0 + n \cdot \Delta f \quad n = 0, 1, \dots, 15 \quad (4.1a)$$

Nechť se pohybuje přijímací uzel (přijímač) po dráze  $s$  dle obr. 4.1. Signál odražený od cíle se vrátí k senzoru zpožděný v čase vzhledem k vyslanému signálu. Nachází-li se cíl v konstantní vzdálenosti  $d$  od vysílače, je toto zpoždění  $\tau_d$  konstantní a je definováno vztahem (4.2),

$$\tau_d = \frac{d}{c} \quad (4.2)$$

kde  $c$  je rychlost světla.

Pro pohybující se cíl je toto zpoždění funkcí času. Přijatý signál  $s_R(t)$  lze pak vyjádřit rovnicí (3), kde vyjadřuje útlum signálu na cestě mezi vysílačem a přijímačem.

$$s_R(t) = A \cdot s_T(t - \tau(t)) = A U (\pm \cos(2\pi f_n (t - \tau(t)) + \varphi) \pm \sin(2\pi f_n (t - \tau(t)) + \varphi)) \quad (4.3)$$

Vzdálenost k cíli  $d(t)$  je pak funkcí času  $t$  a zpoždění signálu vyjádřeno vztahem (4.4).

$$\tau(t) = \frac{1}{c} d(t - \tau(t)) \quad (4.4)$$

Vzorec (4.4) je správný při libovolném způsobu pohybu [19]. Zpoždění  $\tau(t)$  je možno rozložit v Taylorovu řadu (5) v bodě  $t = \tau_d$ .

$$\tau(t) = \tau_d + \dot{\tau}(\tau_d) (t - \tau_d) + \ddot{\tau}(\tau_d) \frac{(t - \tau_d)^2}{2} + \dots \quad (4.5)$$

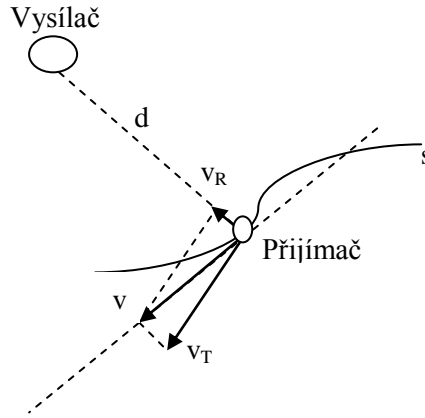
Nechť se definuje rychlost  $v(t)$  a zrychlení  $a(t)$  vztahem (4.6).

$$v(t) = \dot{d}(t) = \frac{dd}{dt} \quad (4.6)$$

$$a(t) = \dot{v}(t) = \ddot{d}(t) = \frac{d^2d}{dt^2}$$

Přijatý signál se pak vyjádří vztahem (4.7).

$$s_{Rn}(t) = A s_{Tn} \left( (t - \tau_d) \left( 1 - \frac{2v(\tau_d)}{c+v(\tau_d)} \right) - (t - \tau_d)^2 \frac{a(\tau_d) c^2}{(c+v(\tau_d))^3} - \dots \right) \quad (4.7)$$



Obr. 4.1 Pohyb přijímače vzhledem k pevnému vysílači.

$v(\tau_d)$  se označí jako radiální rychlost  $v_R$  (viz. obr. 4.1) a  $a(\tau_d)$  jako radiální zrychlení  $a_R$ . Vztah (4.8) potom vyjadřuje Dopplerův posuv kmitočtu  $\Delta f_{Dn}$ .

$$\Delta f_{Dn} = \frac{2v_R f_n}{c + v_R} \quad (4.8)$$

Protože  $v_R \ll c$  lze Dopplerův posuv kmitočtu a rychlost jeho změny vyjádřit vztahy (4.9) a (4.10).

$$\Delta f_{Dn} \approx \frac{2v_R f_n}{c} \quad (4.9)$$

$$\frac{d\Delta f_{Dn}}{dt} = \Delta \dot{f}_{Dn} \approx \frac{2a_R f_n}{c} \quad (4.10)$$

Při zanedbání vyšších derivací kosinovou složku signál (4.7) lze přepsat do tvaru (4.11).

$$s_{Rn}(t) = \pm A U \cos \left( 2\pi \left[ (f_n - \Delta f_{Dn})(t - \tau_d) - \Delta \dot{f}_{Dn} \frac{(t - \tau_d)^2}{2} \right] + \phi \right) \quad (4.11)$$

V praktických aplikacích se radiální zrychlení přijímače  $a_R$  neuvažuje a změna Dopplerova posuvu kmitočtu  $\Delta \dot{f}_{Dn}$  ve vzdálenosti  $d$  se klade rovna nule.

Po průchodu přizpůsobeným filtrem přijímače se získá signál (4.12).

$$s_{Fn}(t) = \pm a. A. U \cos(2\pi \Delta f_{Dn} t + 2\pi (f_n + \Delta f_{Dn})\tau_d + \psi) \quad (4.12)$$

Pro představu o velikosti Dopplerova posuvu kmitočtu budeme uvažovat pohyb přijímače s radiální rychlostí 1 m/s (chůze), nosný kmitočet  $f_n = 2,45$  GHz. Dopplerův posuv kmitočtu  $\Delta f_{Dn}$  má pak velikost 16,3 Hz. Z toho je zřejmé, že při normálních rychlostech je možno Dopplerův posuv ve vztahu (12) vůči kmitočtu  $f_n$  zanedbat. Rovnice (4.12) pak získá tvar (4.13).

$$s_{Fn}(t) = \pm a. A. U \cos(2\pi \Delta f_{Dn} t + 2\pi f_n \tau_d + \psi) \quad (4.13)$$

Rovnice (4.13) říká, že fáze demodulovaného signálu se bude v čase měnit s Dopplerovým kmitočtem  $\Delta f_{Dn}$  a bude mít konstantní posuv v závislosti na zpoždění signálu  $\tau_d$ . Podle vztahu (4.2) má toto zpoždění hodnotu 3 ns na 1 m vzdálenosti od vysílače. Vyjádří-li se rovnice (4.13) pomocí vztahů (4.2) a (4.9), získá se podoba (4.14), kde  $\lambda_n$  je vlnová délka nosné vlny v kanálu  $n$  a je definována vztahem (4.15).

$$s_{Fn}(t) = \pm a. A. U \cos \left( 2\pi \frac{2v_R}{\lambda_n} t + 2\pi \frac{d}{\lambda_n} + \psi \right) \quad (4.14)$$

$$\lambda_n = \frac{c}{f_n} \quad (4.15)$$

Je zřejmé, že ve fázi signálu každého přeneseného symbolu je informace o radiální rychlosti  $v_R$  pohybujícího se přijímače a jeho okamžité vzdálenosti  $d$  od vysílače. Informace o vzdálenosti vysílače je skryta i v útlumu signálu při přenosu. V následující kapitole se budou hledat možnosti, jak tyto informace z přijatého signálu určit.

## 5 Měření vzdáleností a úhlů mezi uzly

### 5.1 Odhad vzdálenosti uzlů z útlumu signálu

Nechť je elektromagnetická vlna vyzařována izotropním zářičem (do všech směrů září stejně), který je umístěn ve volném bezztrátovém homogenním izotropním prostoru. Výkonová hustota  $S_i$  ve vzdálenosti  $d$  od zářiče je pak dána vztahem (5.1), kde  $P_{\text{eirp}}$  je celkový vyzářený výkon, tj. výkon přivedený na vstup izotropního zářiče [20].

$$S_v = \frac{P_{\text{eirp}}}{4\pi d^2} \quad \left[ \text{Wm}^{-2} \right] \quad (5.1)$$

Výkon je obecnou anténou směřován do určitého směru. Anténa má v tomto směru zisk  $G_v$  vzhledem k izotropnímu zářiči. Zisk antény  $G_v$  lze pak definovat jako poměr výkonu  $P_{\text{eirp}}$  na vstupu referenční antény (v našem případě izotropní zářič) k výkonu  $P_v$ , který se musí přivést na vstup skutečné antény, aby produkovala v daném směru totéž pole (stejnou výkonovou hustotu). Takto definovaný zisk lze vyjádřit vztahem (5.2).

$$G_v = \frac{P_{\text{eirp}}}{P_v} \quad (5.2)$$

Ve vzdálenosti  $d$  od vysílací antény je umístěna přijímací anténa, na kterou dopadá vlna o výkonové hustotě  $S_i$  [ $\text{W/m}^2$ ]. Přijímací anténa má efektivní plochu  $A_{\text{ef}}$ . Efektivní plocha antény je definována vztahem (5.3) jako poměr výkonu  $P_p$  na zátěži antény k výkonové hustotě  $S_i$  dopadající na anténu.

$$A_{\text{ef}} = \frac{P_p}{S_s} \quad \left[ \text{m}^2 \right] \quad (5.3)$$



Maximální efektivní plocha antény je dána vztahem (5.4), kde  $\lambda$  je vlnová délka elektromagnetické vlny a  $G_p$  je zisk přijímací antény.

$$A_{ef} = \frac{G_p \lambda^2}{4\pi} \quad (5.4)$$

Výkon na zátěži přijímací antény lze pak vyjádřit „majákovou rovnicí“ (5.5).

$$P_p = \frac{P_{vzp} A_{ef}}{4\pi d^2} = \frac{P_v G_v G_p \lambda^2}{4\pi d^2} \quad [W] \quad (5.5)$$

Přijatý výkon se často vyjadřuje v decibelech vztažených k 1 mW podle vztahu (5.6).

$$P_p [dBm] = 10 \log \frac{P_p}{10^{-3}} = P_v [dBm] + 10 \log G_v + 10 \log G_p + 20 \log \frac{\lambda}{4\pi d} \quad (5.6)$$

Poslední člen pravé strany rovnice (5.6) vyjadřuje ztráty šíření volným prostorem (FSL – Free Space Loss) a lze jej spočítat podle vztahu (5.7), kde  $f$ [MHz] je kmitočet v MHz a  $d$ [km] je vzdálenost v km.

$$FSL [dB] = 32,44 + 20 \log f [MHz] + 20 \log d [km] \quad (5.7)$$

Do rovnice (5.6) se hodnota FSL[dB] dosazuje se záporným znaménkem.

Podle uvedených vztahů lze při znalosti výkonu vysílače a zisků antén odhadnout z úrovně přijatého signálu (RSS – Received Signal Strength) vzdálenost vysílače. Pro každý přijatý paket se změří úroveň signálu. Ta je kvantována na indikátor RSSI (Received Signal Strength Indicator). Hodnota RSSI je dostupná všem vrstvám (MAC, NWK, APL) pro analýzu. Příkladem může být jednoduchý indikátor kvality linky LQI (Link Quality Indicator) vyjádřený jako RSSI. Výhodou využití RSSI jako vstupní veličiny do lokalizačního algoritmu je implicitně vestavěná podpora měření RSSI bez nutnosti přidat další hardware.

Výše uvedené vztahy však platí pouze pro šíření elektromagnetické vlny ve volném prostoru ve vzdálené zóně vysílací antény, kde je elektromagnetické pole homogenní. Ve skutečnosti však dochází k odrazům vlny od okolního terénu (reflection), k rozptylu (scattering) na nerovných a hrubých plochách a různých diskontinuitách (trhliny, nespojitosti, útvary vystupující z roviny) popřípadě k ohybu (diffraction) na velkých překážkách. Vlna se také tlumí průnikem (penetration) různými materiály (zdi budov, atd.). Dochází tak k vícecestnému šíření vlny (multipath propagation) od vysílače k přijímači. V každém bodě prostoru se pak počítá mnoho složek s různými amplitudami a fázemi. Dochází tím k porušení homogenity elektromagnetického pole a lze pak naměřit v blízkých bodech hodnoty signálu lišící se několik desítek decibelů. To se pak řeší průměrováním hodnot z určitého prostoru a zavedením experimentálně zjištěných konstant útlumu  $L$ [dB]. Z uvedeného je zřejmé, že určení vzdálenosti z hodnoty RSS bude značně nepřesné.

Standard IEEE 802.15.4 definuje citlivost přijímače jako nejnižší úroveň signálu  $P_{pmin}$ , při které je chyba paketu PER (Packet Error Rate) nižší než 1%. Standard vyžaduje citlivost přijímače -85 dBm pro pásma 2,4 GHz, 868 a 915 MHz při modulaci OQPSK. Při modulaci BPSK v pásmech 868 a 915 MHz je vyžadována citlivost -92 dBm. Z těchto hodnot lze pak odhadnout podle vztahu (5.8) maximální vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem.

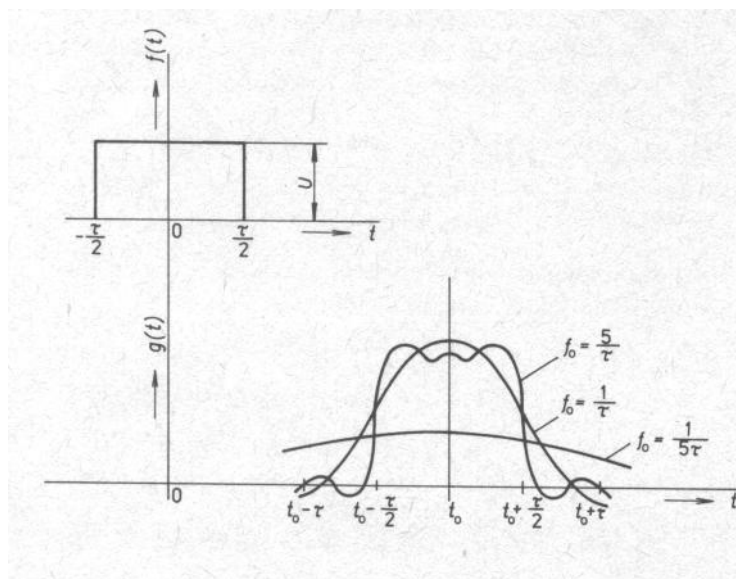
$$d_{max}[km] = 10^{\frac{1}{20}(P_v[dBm] - P_{pmin}[dBm] + G_p[dB] + G_v[dB] - L[dB] - 20 \log f [MHz] - 32,44)} \quad (5.8)$$

Dalšími parametry, které se v souvislosti s RSSI uvádějí, jsou dynamický rozsah, který udává poměr v decibelech maximálního a minimálního výkonu, který je schopen přijímač měřit a přesnost, udávající průměrnou chybu asociovanou s každým měřením RSS.

Metody odhadu vzdálenosti založené na RSSI potřebují pro svou správnou funkčnost vysokou pravděpodobnost přímé viditelnosti mezi uzly LOS (Light OF Sight) a co nejmenší vícecestné šíření vlny.

## 5.2 Odhad vzdálenosti uzlů ze zpoždění přijatého signálu

Přímé měření časového zpoždění přijatého signálu vzhledem k vyslanému signálu je v síti ZigBee prakticky nemožné. Toto měření časového vyžaduje vysílání přesných časových značek a synchronizaci činnosti uzlů na tyto značky. Časová značka je tvořena pravoúhlým impulsem délky  $\tau$ .



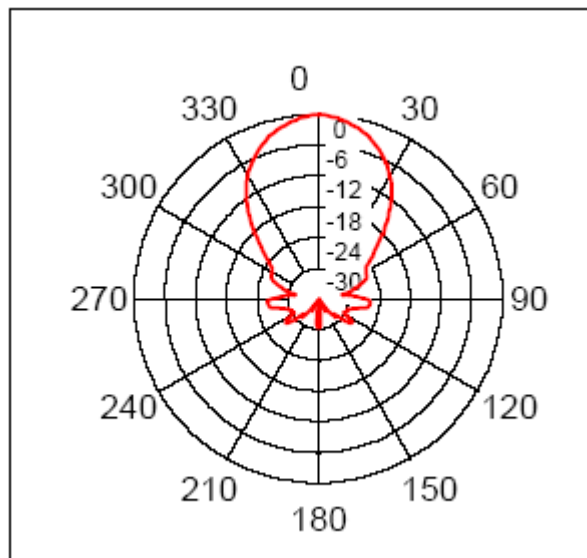
Obr 5.1 Odezva ideální dolní propusti na impuls délky  $\tau$ . [26]

Vysílání značek znamená průchod impulsů filtrem. Odezva ideální dolní propusti na pravouhlý impuls délky  $\tau$  je na obr. 5.1. Z obrázku je zřejmé, že se zvyšujícím se mezním kmitočtem  $f_0$  dolní propusti se zmenšuje zkreslení přijatého pulsu. Aby přijatý pulz měl stejný průběh jako vyslaný, musí být  $f_0 \gg \frac{1}{\tau}$ . Pulz je na přijímací straně zpožděn o čas  $t_0$ , který je určen sklonem fázové charakteristiky propusti.

Podle standardu IEEE 805.15.4 je kmitočtová šířka jednoho kanálu 2 MHz. Této šířce pásma odpovídá nejmenší měřitelný časový úsek asi 500 ns a náběžné, respektive sestupné hrany pulzu budou mít délku asi 250 ns. Podle vzorce (4.2) je tedy nejmenší měřitelná vzdálenost rovna asi 150 m. Protože ve většině aplikací tato vzdálenost překračuje dosah mezi dvěma uzly v síti ZigBee, nelze přímý odečet časového zpoždění použít. V sítích většího rozsahu se však tyto systémy hojně používají a měří buď přímo čas příchodu signálu vzhledem k časové značce (ToA – Time of Arrival) nebo rozdíl časů příchodu signálu (TDoA – Time Difference of Arrival).

Podle [21] byl systém měření časového zpoždění použit v síti ZigBee, měření vzdálenosti byly použity ultrazvukové senzory. Systém využívá skutečnosti, že rychlost elektromagnetické vlny ve volném prostoru je  $3 \cdot 10^8$  m/s a rychlost ultrazvuku ve vzduchu za normálních podmínek je 344 m/s, tj. asi o 6 řádů menší. Vysokofrekvenčním signálem se přenáší pouze časové značky. Ty na pevných uzlech odstartují vyslání krátkého pulzu ultrazvuku a na pohyblivých uzlech spustí čítač, který se zastaví příchodem pulzu ultrazvuku. Z naměřeného času  $\Delta T$  se podle vzorce (5.9) vypočítá vzdálenost uzlů.

$$d = \Delta T \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 344}{3 \cdot 10^8 - 344} = \Delta T * 344,0004 \quad [m] \quad (5.9)$$



Obrázek 5.2: Vyzařovací diagram ultrazvukového dálkoměru SRF02

Odtud plyne, že 1 metr vzdálenosti odpovídá 2,907 ms. Pro rozlišitelnost 1 cm ve vzdálenosti stačí pak šířka vyslaného pulzu ultrazvuku 29  $\mu$ s. Použití ultrazvukových senzorů je vhodné pouze

pro sítě rozměrech v jednotkách metrů při dostatečném pokrytí prostroru. Vyzářovací diagram z obrázku 5.2 ukazuje, že dálkoměr SRF02 má vyzářovací úhel kolem 60°. Pak při jeho umístění na běžný strop může pokrývat plochu kružnice o poloměru 1,4 metru.

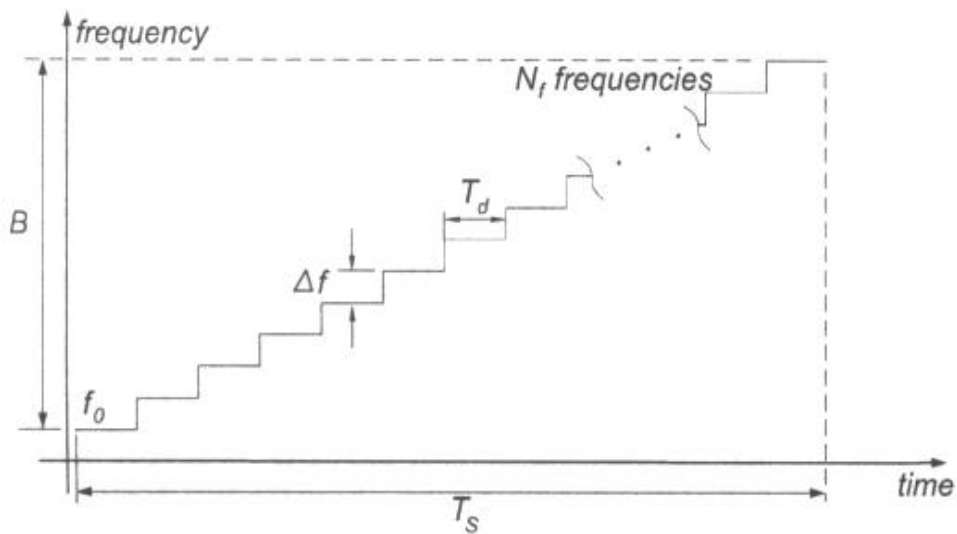
### 5.3 Odhad vzdálenosti uzlů z přepínání kanálů

Z předchozí kapitoly je zřejmé, že pro využití elektromagnetické vlny k měření vzdálenosti uzlů v síti ZigBee je nutné zvětšit kmitočtovou šířku pásma. Toho lze dosáhnout zapojením do měření vzdálenosti všech 16 kanálů, které může síť ZigBee využívat. Kanály jsou přepínány podle obr. 5.3. Tato myšlenka byla použita i v článku [22] pro jiný typ měření. Kmitočtový odstup mezi jednotlivými kanály  $\Delta f$  je 5 MHz a celková využitelná šířka kmitočtového pásma  $B$  je ca 80 MHz. Z toho vyplývá, že nejmenší rozlišitelná vzdálenost mezi uzly  $d_R$ , definovaná vztahem (5.10) je ca 3,75 m.

$$d_R = \frac{c}{B} \tag{5.10}$$

Maximální jednoznačně měřitelná vzdálenost  $d_{max}$  je pak podle vztahu (5.11) asi 60m.

$$d_{max} = N_f * d_R \tag{5.11}$$



Obr. 5.3 Vysílaný signál při změně kmitočtu po krocích (Step Frequency Waveform) s  $N_f$  kmitočty.

$$\Delta f = 5 \text{ MHz}, N_f = 16, B = 80 \text{ MHz. [19]}$$

Demodulovaný přijatý signál jednoho symbolu v kanálu  $n$  je popsán rovnicí (4.13). Po rozepsání kmitočtu kanálu podle vzorce (4.1a) a ovzorkování periodou  $T_d$  se získá pro fázi signálu vztah (5.12).

$$\xi_n = \left( 2\pi \Delta f_{Dn} nT_d + 2\pi \frac{\Delta f \tau_d}{T_d} nT_d + 2\pi f_0 \tau_d + \psi \right) \tag{5.12}$$

V případě, že uzel je v klidu,  $\Delta f_{Dn} = 0$ , fáze signálu lineárně roste v závislosti na čísle kanálu. Ze směrnice této přímky lze pak odvodit vzdálenost uzlu. V případě, že se uzel pohybuje, směrnici

přímky ovlivňuje i Dopplerův kmitočtový posuv a nelze uvedeným způsobem určit vzdálenost uzlu. Pak je třeba provést spektrální analýzu pomocí rychlé Fourierovy transformace (FFT – Fast Fourier Transformation) posloupnosti 16 vzorků. Perioda  $T_D$  musí být zvolena tak, aby kmitočet  $f_s$  definovaný vztahem (5.13) byl výrazně vyšší než kmitočet  $\Delta f_{Dn}$ .

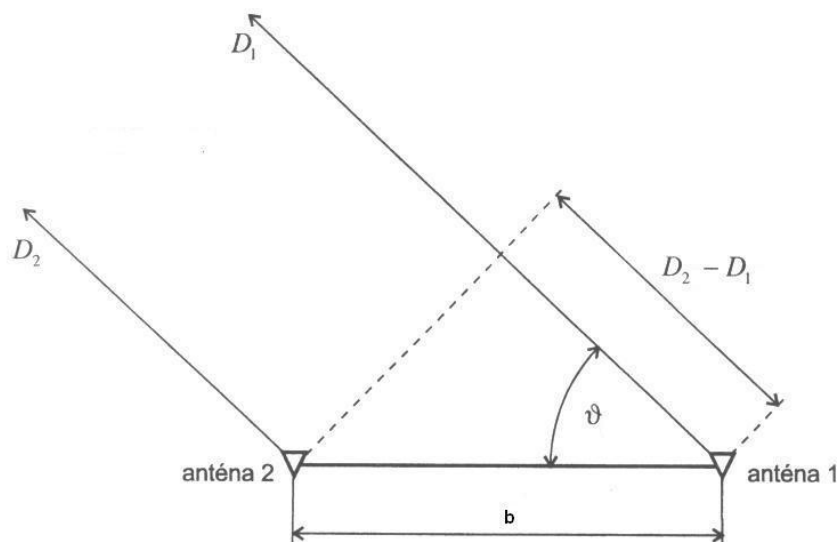
$$f_s = \frac{\Delta f \tau_d}{T_d} \quad (5.13)$$

Měření časového zpoždění se touto metodou převádí na měření fázového rozdílu mezi jednotlivými kanály.

## 5.4 Odhad směru dopadu signálu

Směr dopadu signálu lze měřit pomocí dvou antén, které jsou ve vzdálenosti  $b$  podle obr. 5.4. Metody založené na tomto principu se nazývají interferometrickými. Dopadá-li signál na antény pod úhlem  $\vartheta$ , bude rozdíl drah signálu od pevného uzlu určen vztahem (5.14).

$$D_2 - D_1 = b \sin \vartheta \quad (5.14)$$



Obrázek 5.4 Princip určení směru dopadu signálu na přijímač. [17]

Rozdíl fází odpovídající tomuto rozdílu drah je určen pro  $n$ -tý kanál vztahem (5.15).

$$\Delta \xi_n = 2\pi \frac{b}{\lambda_n} \sin \vartheta \quad (5.15)$$

Měření časového zpoždění se tím převádí na měření rozdílu fáze mezi dvěma anténami.

Pro jednoznačné určení úhlu dopadu může být rozdíl fází roven maximálně  $2\pi$ . Z toho vyplývá, že vzdálenost antén může být maximálně rovna  $\lambda_n$ .

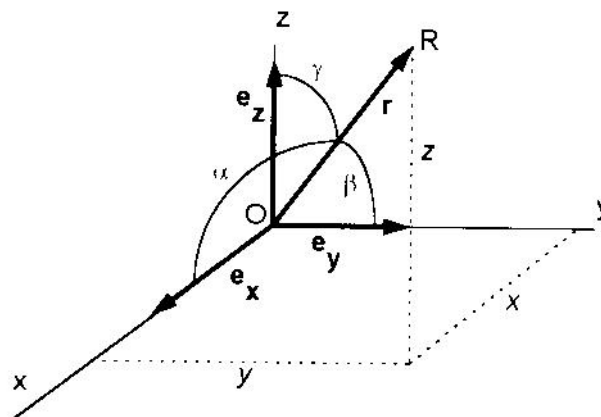
Měření je možno realizovat pomocí dvou pevně spojených přijímačů, každý s vlastní anténou. Signál na výstupu každého přijímače je popsán rovnicí (4.13). Dá se předpokládat, že přijímače budou mít různé vlastní konstantní fázové posuvy  $\psi_1$  a  $\psi_2$ . Rozdíl těchto fázových posuvů se musí před měřením vhodnou kalibrací zjistit. Nevýhodou tohoto systému je použití dvou přijímačů, výhodou je měření pouze na jediném kanálu.

## 6 Lokalizace uzlu v síti

### 6.1 Souřadnicové soustavy

Protože síť ZigBee je prostorově omezená na cca 100 m, zvolí se pro účely lokalizace uzlu v síti souřadnicová soustava, která je spjata s uzly a ne s geografickým umístěním. Souřadnicová soustava je obecně třídimenzionální a pravotočivá. V praxi se však často vystačí s dvojdimenzionální soustavou, kde všechny uzly jsou v jedné rovině nebo dokonce s jednodimenzionální soustavou, kde uzly jsou umístěny v jedné přímce.

Vzhledem k prostorové omezenosti sítě bude se nejčastěji používat pravoúhlá kartézská souřadnicová soustava podle obr. 6.1. Slovo kartézská značí, že na všech souřadnicových osách jsou použita stejná měřítka. Tvoří ji tři navzájem kolmé jednotkové vektory  $\mathbf{e}_x$ ,  $\mathbf{e}_y$ ,  $\mathbf{e}_z$  umístěné ve zvoleném počátku  $O$ . Přímkami, které jsou nositelkami vektorů  $\mathbf{e}$ , se nazývají souřadnicové osy. Polohu libovolného bodu  $R$ , který lze považovat za koncový bod vektoru  $\mathbf{r}$ , umístěného v počátku  $O$ , se vyjádří jednoznačně lineární kombinací (6.1) vektorů  $\mathbf{e}$ .



Obr. 6.1 Pravoúhlá souřadnicová soustava. [16]

$$\mathbf{r} = x \cdot \mathbf{e}_x + y \cdot \mathbf{e}_y + z \cdot \mathbf{e}_z \quad (6.1)$$

Veličiny  $x, y, z$  se pak nazývají souřadnicemi bodu  $R$ . Vynásobí-li se postupně výraz (6.1) skalárně vektory  $\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y, \mathbf{e}_z$ , získá se v důsledku ortogonality vektorů  $\mathbf{e}$  výraz (6.2).

$$x = \mathbf{r} \cdot \mathbf{e}_x, \quad y = \mathbf{r} \cdot \mathbf{e}_y, \quad z = \mathbf{r} \cdot \mathbf{e}_z \quad (6.2)$$

Skalární součin dvou vektorů  $\mathbf{a}, \mathbf{b}$  je definován vztahem (6.3).

$$\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = x_a x_b + y_a y_b + z_a z_b \quad (6.3)$$

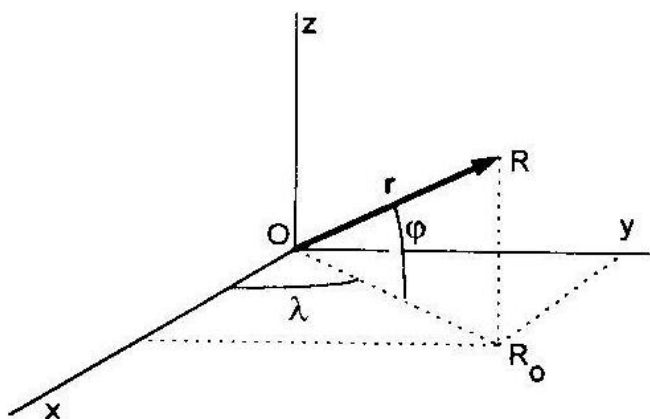
Souřadnice  $x, y, z$ , vznikají tedy jako průmět vektoru  $\mathbf{r}$  do souřadnicových os podle vztahu (4).

$$x = r \cdot \cos \alpha, \quad y = r \cdot \cos \beta, \quad z = r \cdot \cos \gamma \quad (6.4)$$

Velikost vektoru  $\mathbf{r}$ , která se označuje  $r$  je definována vztahem (6.5), představuje vzdálenost bodu  $R$  od středu souřadnicové soustavy  $O$ .

$$r = |\mathbf{r}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (6.5)$$

V některých případech je výhodnější určit polohu bodu  $R$  pomocí vzdáleností  $r$  a dvou úhlů podle obr. 6.2.



Obr. 6.2 Sférická souřadnicová soustava. [16]

Veličiny  $r, \varphi, \lambda$  se nazývají sférické souřadnice bodu  $R$ . Z obr. 6.2 platí výrazy (6.6), respektive inverzní vztahy (6.7).

$$x = r \cos \varphi \cos \lambda \quad (6.6)$$

$$y = r \cos \varphi \sin \lambda$$

$$z = r \sin \varphi$$

$$\lambda = \arctan \frac{y}{x} \quad (6.7)$$

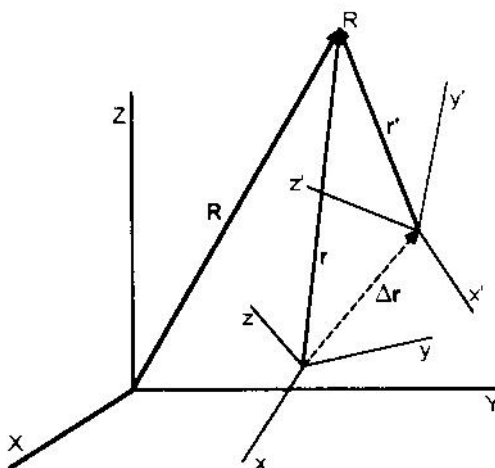
$$\varphi = \arctan \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}} = \arcsin \frac{z}{r}$$

V mnoha případech je výhodné z důvodu jednodušších matematických operací pracovat v jedné souřadnicové soustavě a pak data transformovat do jiné souřadnicové soustavy. Typickým případem

může být právě volba počátku souřadnicové soustavy u sítě ZigBee. Při určování polohy uzlu je výhodné položit počátek souřadnicové soustavy do jednoho z centrálních uzlů s tím, že další pevný uzel bude ležet na jedné z os této soustavy. Matematické výpočty pak budou jednoduché, ale orientace takto zvolené souřadnicové soustavy bude vzhledem k okolnímu prostoru nesmyslná. Bude-li síť například umístěna v nějaké místnosti, bude lepší z hlediska ověřování polohy uzlu umístit počátek soustavy do jednoho rohu místnosti a osy budou tvořeny hranami koutů místnosti. Pak je nutno souřadnice uzlu v původní soustavě přetransformovat do nové souřadnicové soustavy.

V prostoru se zvolí souřadnicová soustava  $X, Y, Z$  a předpokládá se, že v této soustavě je vyjádřen vektor  $\mathbf{R}$ . Zvolí se další dvě souřadnicové soustavy  $S(x, y, z)$  a  $S'(x', y', z')$  podle obr. 6.3. Předpokládá se, že souřadnicové osy jsou nositelkami jednotkových vektorů  $\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y, \mathbf{e}_z$ , respektive  $\mathbf{e}_{x'}, \mathbf{e}_{y'}, \mathbf{e}_{z}'$ . Necht'  $\mathbf{r}$  a  $\mathbf{r}'$  jsou polohové vektory bodu  $R$  v soustavě  $S$ , respektive  $S'$  a  $\Delta\mathbf{r}$  je polohový vektor počátku soustavy  $S'$  vůči  $S$ . Jejich vzájemný vztah vyjadřuje rovnice (6.8).

$$\mathbf{r} = \Delta\mathbf{r} + \mathbf{r}' \quad (6.8)$$



Obr. 6.3 Transformace souřadnic. [16]

Po vyjádření  $\mathbf{r}$  a  $\mathbf{r}'$  pomocí složek v odpovídajících souřadnicových soustavách, získá se vztah (6.9).

$$x \mathbf{e}_x + y \mathbf{e}_y + z \mathbf{e}_z = \Delta\mathbf{r} + x' \mathbf{e}_{x'} + y' \mathbf{e}_{y'} + z' \mathbf{e}_{z'} \quad (6.9)$$

Skalárním vynásobením výrazu (6.9) postupně vektory  $\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y, \mathbf{e}_z$  se získají rovnice (6.10).

$$x = \Delta x + x' \cos(x', x) + y' \cos(y', x) + z' \cos(z', x) \quad (6.10)$$

$$y = \Delta y + x' \cos(x', y) + y' \cos(y', y) + z' \cos(z', y)$$

$$z = \Delta z + x' \cos(x', z) + y' \cos(y', z) + z' \cos(z', z)$$



Výrazy  $(x', x)$ ,  $(y', x)$  atd. vyjadřují úhly mezi souřadnicovými osami soustavy  $S'$  a  $S$ .

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = (x, y, z)^T, \mathbf{S}' = \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = (x', y', z')^T, \Delta\mathbf{S} = \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} = (\Delta x, \Delta y, \Delta z)^T \quad (6.11)$$

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \cos(x', x) & \cos(y', x) & \cos(z', x) \\ \cos(x', y) & \cos(y', y) & \cos(z', y) \\ \cos(x', z) & \cos(y', z) & \cos(z', z) \end{pmatrix},$$

Vyjádřením vektorů  $\mathbf{S}$ ,  $\mathbf{S}'$ , vektoru posunu (translace)  $\Delta\mathbf{S}$  a matice otočení (rotace)  $\mathbf{R}$  podle vztahů (6.11), soustavu rovnic (6.10) vyjádřit vztahem (6.12).

$$\mathbf{S} = \Delta\mathbf{S} + \mathbf{R} \mathbf{S}' \quad (6.12)$$

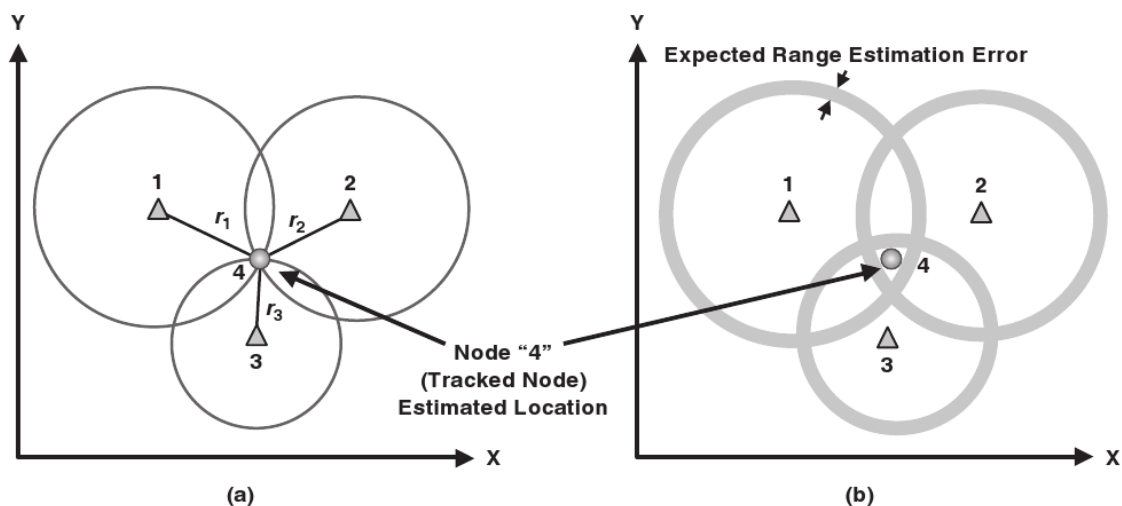
Nejsou-li úhly mezi jednotlivými osami známy, je možné provést transformaci postupně pomocí tří rotací [16].

## 6.2 Dálkoměrný systém určování souřadnic

U dálkoměrného systému se počítá polohový vektor  $\mathbf{r}$  pohyblivého uzlu ze vzdálenosti  $d_i$  od pevného  $i$ -tého uzlu se známým polohovým vektorem  $\mathbf{r}_{si}$ . Tato vzdálenost se vyjádří vztahem (6.13).

$$d_i = |\mathbf{r} - \mathbf{r}_{si}| = \sqrt{(\mathbf{r} - \mathbf{r}_{si})^T (\mathbf{r} - \mathbf{r}_{si})} = \sqrt{(x - x_{si})^2 + (y - y_{si})^2 + (z - z_{si})^2} \quad (6.13).$$

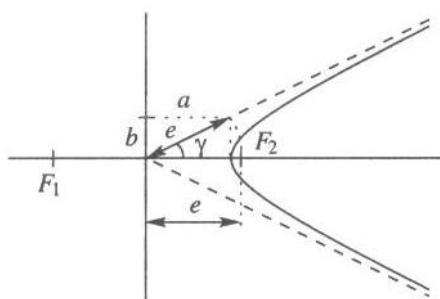
Rovnice (6.13) tvoří soustavu kvadratických rovnic. Ve dvojdimenzionálním prostoru tyto rovnice vyjadřují kružnice. Při dvou pevných uzlech se tyto kružnice protínají obecně ve dvou bodech, kde může nalézat pohyblivý uzel. Tyto body jsou symetricky rozloženy kolem spojnice pevných uzlů. Pokud není možno určit jiným způsobem (např. vymezením poloroviny pohybu uzlu), ve kterém z těchto bodů se pohyblivý uzel nalézá, je nutno systém doplnit ještě o jeden pevný uzel, jak je znázorněno na obr. 6.5. Tato metoda řešení se nazývá trilaterace. Vlivem nepřesností měření se kružnice nemusí protínat v jediném bodě. Pak se poloha pohyblivého uzlu optimalizuje na nejmenší kvadratickou odchylku, jak je naznačeno v [25]. Přidáním dalších pevných uzlů se pak zvyšuje přesnost odhadu. Podobné metody se používá i k určování souřadnic GPS, kde byly vypracovány pro řešení soustavy kvadratických rovnic účinné algoritmy [17].



Obr. 6.5 Odhad polohy pohyblivého uzlu metodou trilaterace: a) ideální případ, b) při měřeních zatížených chybami. [7]

Oblíbeným řešením je tzv. hyperbolický systém určování souřadnic. V tomto systému se hledají geometrická místa bodů konstantního rozdílu vzdáleností  $d_1$  a  $d_2$  od dvou pevných uzlů. Tímto geometrickým místem bodů je hyperbola popsaná rovnicí (6.14). Minimální počet pevných uzlů musí být zde o jeden větší než počet určovaných souřadnic. Vztah parametrů hyperboly s konfigurací měřicího systému popisuje obr. 6.5 a tabulka 6.1 podle [18].

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (6.14)$$



Obr. 6.5 Hyperbola – popis parametrů. [18]

	Hyperbola	Systém
a	Reálná poloosa hyperboly	$2a = d_1 - d_2$
b	Imaginární poloosa hyperboly	$b = \sqrt{e^2 - a^2}$
e	Délková výstřednost hyperboly	Polovina vzdáleností pevných uzlů
$\gamma$	Úhel asymptoty	$tg \gamma = \frac{b}{a}$
$F_1, F_2$	Ohniska paraboly	Stanoviště pevných uzlů

Tabulka 6.1 Parametry hyperboly.

Z každého naměřeného rozdílu vzdáleností se získá jedna hyperbola, na které leží pohyblivý uzel. Pro určení polohy uzlu se potřebuje v rovinném případě průsečík dvou hyperbol a v prostorovém pak průsečík tří rotačních hyperboloidů, jejichž osa rotace prochází ohnisky (pevné uzly).

## 6.3 Časoměrný systém určování souřadnic

Časoměrný systém určuje polohu pohyblivého uzlu z času příchodu  $t_i$  signálů vyslaných pevnými uzly. Čas vyslání  $t_t$  přijatého signálu pohyblivý uzel však nezná. Pro určení polohy je nezbytné ho určit nebo eliminovat.

Vzdálenost  $d_i$  pohyblivého uzlu od  $i$ -tého pevného uzlu se určuje podle rovnice (6.15).

$$d_i = c \cdot t_i = |\mathbf{r} - \mathbf{r}_{si}| + c \cdot t_t \quad (6.15)$$

Do soustavy rovnic přibyla další neznámá a tím i další pevný uzel. Časy  $t_i$  a  $t_t$  se počítají k dané časové značce. V jedné časové značce může vysílat pouze jeden pevný uzel. V malém prostoru, kde většinou síť ZigBee bývá instalována, je tato metoda těžko použitelná. Při vzdálenosti pevného a pohyblivého cíle 10 m se časový rozdíl  $t_i - t_t$  rovná 33 ns. Časové značky musí být tedy synchronizovány s přesností jednotek nanosekund a to je těžko proveditelné.

## 6.4 Směroměrný systém určování souřadnic

Směroměrný systém určuje polohu pohyblivého uzlu ze směru dopadu signálu vysílaného pevným uzlem na anténní systém pohyblivého uzlu. Směr dopadu z výše definovaných systémů měření určuje pouze interferometrický systém. Úhel  $\alpha_i$  se odečítá od kolmice ke spojnici dvojice měrných antén v rozmezí  $0^\circ$  až  $180^\circ$ . Při pohybu uzlu musí tato spojnice zachovávat konstantní směr, který je rovnoběžný s jednou souřadnicovou osou respektive se souřadnicovou rovinou. V případě roviny existují pouze dvě přímky, na kterých může ležet pohyblivý uzel a které se protínají v místě pevného uzlu. Je-li tato spojnice například rovnoběžná s osou  $x$ , budou tyto přímky definovány rovnicí (6.16).

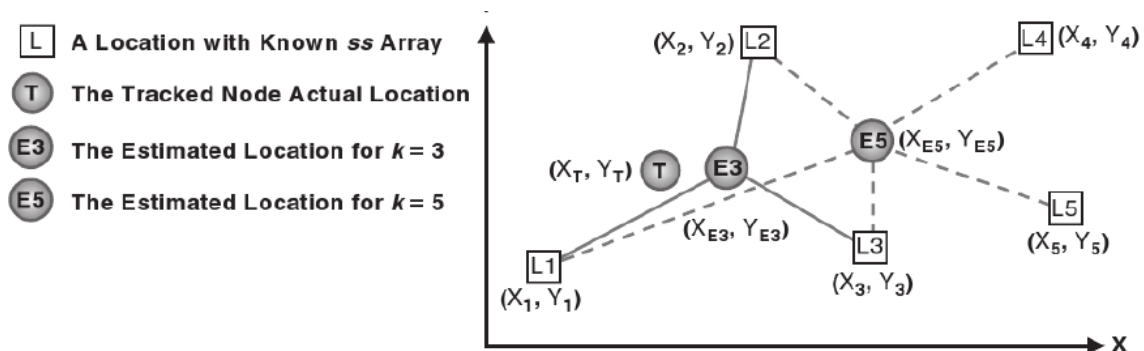
$$x - x_{si} = \operatorname{tg} \alpha_i (y - y_i) \quad (6.16)$$

Při zaměření dvou pevných uzlů se snadno spočítají souřadnice  $x$ ,  $y$  průsečíku směrových přímek. V případě třídimenzionálního prostoru tvoří směrové přímky kužele s vrcholy v pevných uzlech. Pohyblivý uzel pak leží na průsečíku kružnic podstav těchto kuželů.

## 6.5 Metoda „otisku“ (fingerprint)

Princip této metody na rozdíl od výše uvedených metod nespočívá v měření vzdáleností nebo úhlů, ale na určitých vlastnostech pokrytí prostoru signálem. Při odhadu vzdálenosti z úrovně přijatého signálu je vícecestné šíření nežádoucí. Zde je vícecestné šíření výhodou. Při kombinaci vícecestného šíření s ostatními vlastnostmi šíření signálu dává jednoznačný popis každé pozice přijímače. Systém obsahuje databázi se signálovými popisy (RSSI měření) pro určitou plochu, která je rozdělena mřížkou. Jedná se tedy o obecný přístup, kdy uzel vyhodnocuje svoji polohu na základě změřené RSSI a znalostí z databáze.

Systém určování polohy se uskutečňuje ve dvou fázích. V první fázi učení „off-line“ se pro každý bod odměří síla signálu z několika pevných uzlů a výsledný vektor se uloží do databáze. Tomuto vektoru se říká RF otisk (RF fingerprint) a databázi se říká „radiomapa“. Měření se opakuje a průměruje pro větší přesnost. V této fázi jsou pevné uzly pouze vysílači a pohyblivé uzly přijímači. Uzel si uloží do své tabulky vektory RSSI ke všem pevným uzlům pro dané pozice. Ve druhé fázi provozní „real-time“ pohyblivý uzel měří aktuální vektor RSSI ke všem pevným uzlům v dané pozici a aplikuje vybranou metodu pro aproximaci polohy vzhledem k referenčním vektorům RSSI. Aproximační metody mají různou přesnost a označují se jako „jeden nejbližší soused“ (JNS), „k – nejbližší sousedi“ (KNS) a „vážený k – nejbližší sousedi“ (VKNS). Metoda JNS vybere jeden vektor a prohlásí ho za svou polohu. Metoda KNS vybere k - nejbližších sousedů a zprůměruje jejich polohy. Metoda je přesnější než JNS, ale příliš velký počet sousedů vede k chybám. Základní princip metody KNS je na obr. 6.6.



Obr. 6.6 Základní princip metody KNS (k- nejbližší sousedi). [7]

Metoda VKNS respektuje různou vzdálenosti pozic od aktuální pozice a přidává jim váhu [7].

# Závěr

Diplomová práce rozebírá možnosti lokalizace uzlu v síti ZigBe. Jedná se o malou lokální síť (LR-WPAN) splňující podmínky standardu IEEE 802.15.4. Z provedeného rozboru vyplývá, že je to velmi komplikovaným problémem. Neexistuje metoda, která by byla použitelná za každých podmínek. Některé metody požadují úpravy hardware (doplnění ultrazvuku, použití dvou přijímačů), jiné komplikované kalibrace (fingerprint). Použití některých metod vyžaduje rozměrové omezení sítě (přepínání kmitočtu, ultrazvuk) a jiné jsou pro malé sítě nepoužitelné (ToA, TDoA). Využívání sítě ZigBee je relativně nové a jejich další rozvoj prověří použitelnost uvedených metod.

Lokalizace je vždy založena na určení vzdáleností nebo úhlů pohyblivého uzlu vzhledem k pevným uzlům.

Vzdálenost se může určit z:

- úrovně přijatého signálu (RSSI)
  - o požadavek na volný prostor šíření
  - o malá přesnost
  - o složitá kalibrace
  - o rozsah sítě neomezen
- časového zpoždění signálu
  - o při použití elektromagnetické vlny nejmenší měřitelná vzdálenost asi 150 m – nevhodné pro síť ZigBee
  - o při použití ultrazvuku rozlišitelnost v řádech centimetrů
    - rozsah sítě omezen vlastnostmi ultrazvukových senzorů na jednotky metrů
    - nutné úpravy „hardware“
- přepínáním kanálů
  - o měření časového zpoždění signálu je převedeno na měření změny fáze
  - o mezi uzly sítě musí být vzdálenost minimálně 3,75 m, maximálně 60 m
  - o nutný přímý přístup na fyzickou vrstvu podle IEEE 802.15.4

Úhel se určí interferometrem:

- o nutno použít dva přijímače v jednom pohyblivém uzlu
- o měření časového zpoždění signálu je převedeno na měření rozdílů fáze signálů na výstupu přijímačů
- o rozsah sítě neomezen
- o nutný přímý přístup na fyzickou vrstvu podle IEEE 802.15.4
- o nutná kalibrace

Metoda určování souřadnic není principiálně závislá na použitých měřících metodách. Určení souřadnic pohyblivého uzlu vyžaduje vždy zjištění vzdálenosti, času příchodu signálu nebo úhlu dopadu signálu vzhledem k několika pevným uzlům v závislosti počtu souřadnic. Souřadnicový systém je lokální a počátek je zasazen do vybraného uzlu (ZigBee koordinátor).

Metoda otisku (fingerprinting) je založena pouze na statistickém zpracování dat RSSI a tvoří samostatnou kategorii.

Technická provedení jednotlivých možností se v diplomové práci neřeší.

# Literatura

- [1] Gislason, D.: ZigBee Wireless Networking. Elsevier. 2008, ISBN 978-0-7506-8597-9.
- [2] Capalini, R.: Simulace bezdrátových senzorových sítí. BP FIT VUT v Brně, 2008.
- [3] Sohraby, K. – Minoli, D. – Znati, T.: Wireless sensor networks: technology, protocols, and applications. John Wiley and Sons, New Jersey, 2007, ISBN 978-0-471-74300-2.
- [4] Cambridge Consultants Ltd: Zonal Location and Asset. Tracking with ZigBee Technology (using RSSI). Cambridge Consultants Ltd, 2006.
- [5] WWW stránky: Začínáme se ZigBee pod taktovkou Microchipu.  
<http://hw.cz/teorie-a-praxe/art2947-zaciname-se-zigbee-pod-taktovkou-microchipu.h>,  
2009-16-06 [cit. 2010-24-05].
- [6] Schmid, T.: GNU Radio 802.15.4 En- and Decoding. University of California, Los Angeles.
- [7] Farahani, S.: ZigBee Wireless Networks and Transceivers. Elsevier, 2008, ISBN 978-0-7506-8597-9.
- [8] IEEE Standard for Information technology: IEEE Std 802.15.4™-2006 Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). 2006
- [9] WWW stránky: Wikipedia Phase-shift keying.  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Phase-shift\\_keying#Offset\\_QPSK\\_.28OQPSK.29](http://en.wikipedia.org/wiki/Phase-shift_keying#Offset_QPSK_.28OQPSK.29),  
2010-24-05 [cit. 2010-24-05].
- [10] Kolodziej, W. K. – Hjelm, J.: Local Positioning Systems: LBS Applications and Services. CRC Press, 2006.
- [11] Hyuntae Cho, Yunju Baek: Precise Location Tracking System based on Time Difference of Arrival over LR-WPAN. MELT'08, 2008-09-19.
- [12] Niculescu, D. – Nath, B.: DV based positioning in ad hoc networks. In Journal of Telecommunication Systems, 2003.
- [13] Huang, T. He C. - Blum, B. M. - Stankovic, J. A. - Abdelzaher, T. F.: Range-free localization schemes in large scale sensor networks,. In Proceedings of the Ninth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'03), 2003.
- [14] Rainer Mautz: Overview of Current Indoor Positioning Systems. Swiss Federal Institute of Technology, 2008
- [15] Fuchs M.: Řízení bezdrátové komunikace pomocí ZigBee. DP FEKT VUT, 2008.
- [16] Kabeláč J., - Kostelecký J.: Geodetická astronomie. Praha, ČVUT, 1998.
- [17] Hrdina, Z. - Pánek, P. – Vejražka, F.: Rádiové určování polohy. Družicový systém GPS. Praha, ČVUT, 1999.

- [18] Bezoušek, P. – Šedivý, P.: Radarová technika. Praha, ČVUT, 2004
- [19] Skolnik, M. I.: Radar Handbook, McGraw-Hill, 1970.
- [20] Mazánek, M. – Pechač, P. - Vokurka J.: Antény a šíření vln. Praha, ČVUT, 2001.
- [21] WWW stránky: The Cricket Location System.  
<http://cricket.csail.mit.edu/#news>, 2006-03-13 [cit. 2010-05-24].
- [22 ] Schwarzer, S. - Vossiek, M. - Pichler, M. - Stelzer, A.: Precise Distance Measurement with IEEE 802.15.4 (ZigBee) Devices. Radio and Wireless, 2008.
- [23] Boukerche , A.: Algorithms and protocols for wireless sensor networks. Wiley, 2009.
- [24] Elson, J. E.: Time Synchronization in Wireless Sensor Networks. University of California, Los Angeles, 2003.
- [25] Capalini R.: Lokalizace uzlů v senzorové síti ZigBee. Semestrální práce FIT VUT, Brno, 2010.
- [26] Hoffner, V.: Úvod do teorie signálů. Praha, SNTL, 1979.