



UNIVERSITE DE RENNES 1

Zigbee Routage

Bernard Cousin



Les applications Zigbee typiques

- Energy Management and Efficiency

- To provide management

Security
HVAC
AMR
Lighting Control
Access Control

BUILDING AUTOMATION

ENERGY MGT. & EFFICIENCY

Demand Response
Net Metering
AMI, SCADA

CONSUMER ELECTRONICS

TV
VCR
DVD/CD
Universal Remotes

energy usage,
choice, better
environmental impact.

- Home Automation

- To provide cooling anywhere

Patient monitoring
Fitness monitoring

PERSONAL HEALTH CARE

TELECOM SERVICES

M-commerce
Info Services
Object Interaction
(Internet of Things)

PC & PERIPHERALS

Mouse
Keyboard
Joystick

heating and
cooling is from

- Building

- To integrate cooling

Asset Mgt
Process Control
Environmental
Energy Mgt

INDUSTRIAL CONTROL

HOME CONTROL

Security
HVAC
Lighting Control
Access Control
Irrigation

lighting, heating,

- Industrial Automation

- To extend existing manufacturing and process control systems reliability.

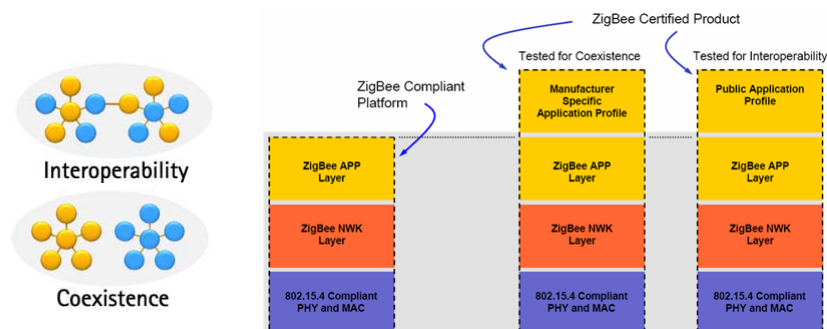
ZigBee requirements

The ZigBee standard was developed to address the following needs:

- Low cost
- Secure
- Reliable and self healing
- Flexible and extendable
- Low power consumption
- Easy and inexpensive to deploy
- Global with use of unlicensed radio bands
- Integrated intelligence for network set-up and message routing

ZigBee is the only standards-based technology that addresses the unique needs of most remote monitoring and control sensory network applications.

ZigBee certification



- Products that use public application profiles are tested to ensure interoperability with other ZigBee end products.
- Products that use manufacturer-specific profiles, which will operate as “closed systems”, are tested to ensure they can coexist with other ZigBee systems: that is, they do not adversely impact the operation of other ZigBee-certified products and networks.

Présentation de Zigbee

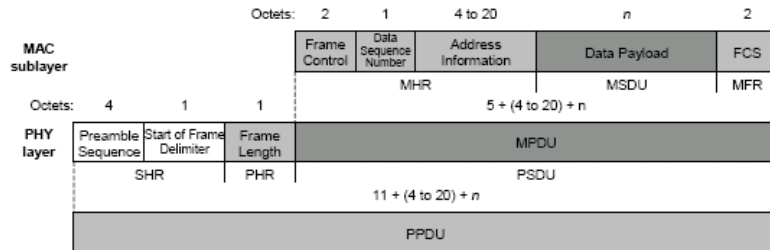
- Zigbee :
 - Proposé en 1998
 - Normalisé en mai 2003, puis 2006
 - À bas coût : 1\$
 - Diffusion large
 - À basse consommation
 - Longue durée de vie
 - Communication dans un réseau
 - Augmentation de l'étendue
 - Multi-saut
 - **Le Routage est nécessaire !**



Caractéristiques du réseau ZigBee

- Low data throughput: up to 250 Kbit/s
- Protocol stack: 32 KBytes
- Number of nodes: 2^{64}
- Range: 1 – 20 m
- Addressing: short 8-bit address or IEEE 64-bit address
- Topologie :
 - Étoile, arborescente, maillée
- Bande fréquentielle : "ISM band"
 - Europe 868 MHz (1 channel); USA + Australie : 915 MHz (10 channels)
 - ; Monde : 2.4 GHz (16 channels)
- Délai de réveil : Down to 15 ms (Bluetooth : 3 s)
- Channel switching, link quality estimation, energy detection measurement, clear channel assessment
- Channel access : CSMA-CA or slotted CSMA-CA

Format général des trames IEEE 802.4.15



21 janvier 2013

ZigBee Routing

7

Les types de trames

The IEEE 802.15.4 MAC defines four frame structures:

- **Beacon** frame, used by a coordinator to transmit beacons.
- **Data** frame, used for all transfers of data.
- **Acknowledgment** frame, used for confirming successful frame reception.
- **MAC command** frame, used for handling all MAC peer entity control transfers.

Octets: 2	1	4/10	2	variable	variable	variable	2
Frame control	Sequence number	Addressing fields	Superframe specification	GTS fields (Figure 38)	Pending address fields (Figure 39)	Beacon payload	FCS
MHR			MAC payload				MFR

Octets: 2	1	(see 7.2.2.2.1)	variable	2
Frame control	Sequence number	Addressing fields	Data payload	FCS
MHR			MAC payload	MFR

Octets: 2	1	2
Frame control	Sequence number	FCS
MHR		MFR

Octets: 2	1	(see 7.2.2.4.1)	1	variable	2
Frame control	Sequence number	Addressing fields	Command frame identifier	Command payload	FCS
MHR			MAC payload		MFR

21 janvier 2013

ZigBee

8

Plan

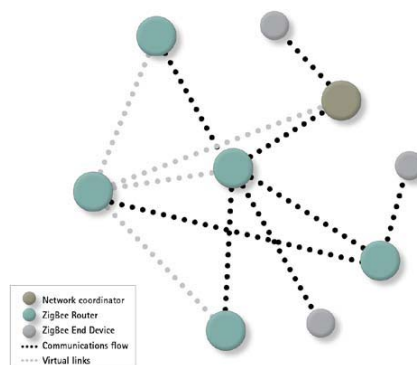
- Présentation de Zigbee
- Introduction au réseau Zigbee
- "No routing"
- Le routage arborescent
- Le routage AODV
- Autres routage spécifiques

Bibliographie

- Protocols and architectures for wireless sensor networks.
by H. Karl, A. Willig. Wiley, 2005.
- ZigBee Resource Guide
A Webcom Publication, 2011
- ZigBee Wireless Networking
by Drew Gislason. Newnes Publications, 2008
- ZigBee Wireless Networks and Transceivers
by Shahin Farahani. Newnes Publications, 2008
- Low-Rate Wireless Personal Area Networks: Enabling Wireless Sensors with IEEE 802.15.4
by Jose A. Gutierrez, Edgar H. Callaway, and Raymond L. Barrett. IEEE Press, 2003
- Wireless Sensor Networks: Architectures and Protocols
by Edgar H. Callaway. CRC Press 2004.
- Zigbee / IEEE 802.15.4 Standard
by Dusan Stevanovic, 2007
- Getting Started with ZigBee and IEEE 802.15.4.
Daintree Networks2008
- ZigBee/IEEE 802.15.4 Summary,
by Sinem Coleri Ergen, 2004
- Wireless Sensor Networks: a Survey on the State of the Art and the 802.15.4 and ZigBee Standards
by Paolo Baronti, Prashant Pillai, Vince Chook, Stefano Chessa, Alberto Gotta, Y.Fun Hu, Computer Communication, Volume 30 , Issue 7, pages 1655-1695, 2007.

Les types d'équipement ZigBee

- Le coordinateur ZigBee (ZC) :
 - Un et un seul
 - Tiers de confiance
 - Racine du réseau et passerelle vers les autres réseaux
 - Alimentation permanente
- Le routeur ZigBee (ZR) :
 - Equipement intermédiaire
 - Qui route les paquets au sein du réseau (extension de l'étendue du réseau, routes de secours en cas de congestion ou de panne)
 - Alimentation permanente
- L'équipement terminal Zigbee (ZED)
 - Ne communique qu'avec un routeur ou le coordinateur
 - Endormi la plupart du temps



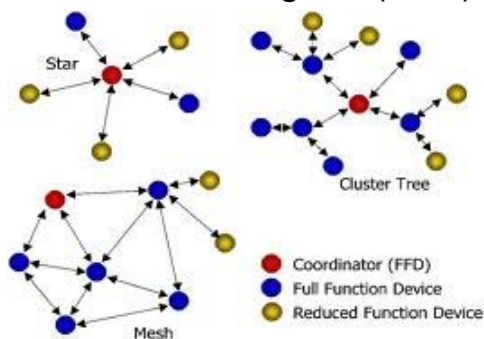
21 janvier 2013

ZigBee Routing

11

Les types d'équipement ZigBee

- Le coordinateur ZigBee (ZC) :
- Le routeur ZigBee (ZR) :
- L'équipement terminal Zigbee (ZED)



21 janvier 2013

ZigBee

12

La topologie maillée

- Un réseau composé des routeurs et de terminaux Zigbee.
- Chaque routeur est généralement connecté par plusieurs chemins et achemine les paquets de données de ses voisins.
 - Communications multi-hops
 - Choix du meilleur chemin
 - Tolérance aux pannes et aux interférences
- Avantages :
 - Robustesse
 - les routeurs vont trouver des routes de secours
 - Extensibilité
 - Augmentation du diamètre du réseau
 - Couverture de zones difficilement accessibles, signaux faibles, etc.
- Inconvénients
 - Complexité

21 janvier 2013

ZigBee Routing

13

Les services de la couche Réseau de Zigbee

Responsibilities of the ZigBee NWK layer are:

- **Starting a network** (NLME): The ability to successfully establish a new network.
- **Joining and leaving a network** (NLME): The ability to gain membership (join) or relinquish membership (leave) a network.
- **Configuring a new device** (NLME): The ability to sufficiently configure the stack for operation as required.
- **Addressing** (NLME): The ability of a ZigBee coordinator to assign addresses to devices joining the network.
- **Topology specific routing** (NLDE): The ability to transmit an NPDU to an appropriate device that is either the final destination of the communication or the next step toward the final destination in the communication chain
- **Neighbor discovery** (NLME): The ability to discover, record, and report information pertaining to the one hop neighbors of a device.
- **Routing Discovery** (NLME): The routing process which builds routing table.
 - NLME : Network Layer Management
 - NLDE : Network Layer Delivery

21 janvier 2013

ZigBee Routing

14

Les protocoles de routage Zigbee

- Quatre méthodes de routage
 - Par protocole de routage
 - Par routage arborescent
 - "No Routing"
 - Autres routages
 - Many-to-one routing
 - Source Routing
- Cahier des charges
 - Plus ou moins adapté à n'importe quelle topologie et changement dynamique de topologie
 - Plus ou moins grande quantité d'informations stockées, de traitement, de messages de contrôle échangés

21 janvier 2013

ZigBee Routing

15

No routing

- Un coordinateur et un ou plusieurs end-devices qui lui sont directement connectés
 - La topologie est en étoile
 - Le coordinateur connaît tous ses end-devices
 - Apprentissage fait lors de la première connexion
 - Un end-device communique uniquement avec son coordinateur
- Remarque : Equivalent au routage arborescent avec Rm: 0, Dm: <infini>, Lm: 1

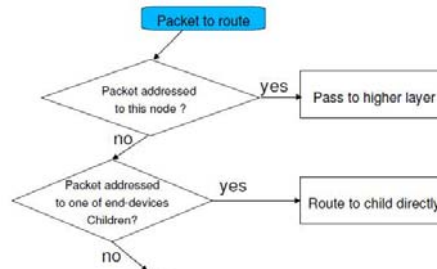
21 janvier 2013

ZigBee Routing

16

No routing

- Un processus de routage très simple
- Par exemple
 - Le noeud 14:
 - Terminaux = {25, 36}
 - S'il reçoit un message pour le terminal 19
 - Il est détruit
 - S'il reçoit un message pour 25
 - Il est retransmis vers 25



21 janvier 2013

ZigBee Routing

17

Routage arborescent Zigbee

- La topologie est en arbre
 - Tout noeud a au plus un père (tous en ont un et un seul sauf le coordinateur)
- Le routage utilise la structure arborescente
 - On n'utilise pas la table de routage
 - On n'utilise pas les raccourcis, on surcharge le coordinateur
- Le routage est défini lors de l'attribution des adresses
 - Le routage n'est pas souple

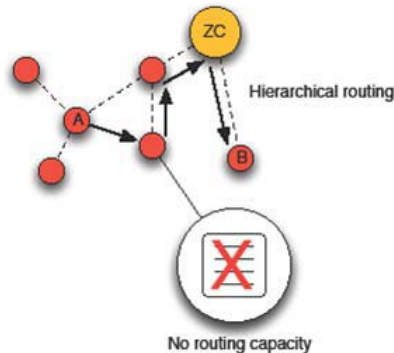
21 janvier 2013

ZigBee Routing

18

Routage arborescent

Ne nécessite pas de table de routage.



21 janvier 2013

ZigBee

19

Allocation des adresses pour le routage arborescent

- Network Address Assignment:
 - Constantes fixées par le Zigbee coordinator:
 - **Rm**: maximum number of routers devices that each router may have as children
 - **Dm**: maximum number of end devices that each router may have as children
 - **Lm**: maximum depth of the tree
 - Chaque terminal a une adresse qui dépend de sa position dans l'arbre
 - Chaque nœud prend le plus petite adresse disponible
 - Chaque routeur (coordinateur inclus) alloue une adresse à chacun de ses terminaux en fonction de sa plage d'adresses qui dépend de sa position dans l'arbre
 - Le nombre d'adresses associées à un routeur du niveau $d < Lm$ est définie par la récurrence suivante :
 - $A(d) = 1 + Dm + Rm$ if $d = Lm - 1$
 - $A(d) = 1 + Dm + Rm.A(d+1)$ if $0 \leq d < Lm - 1$

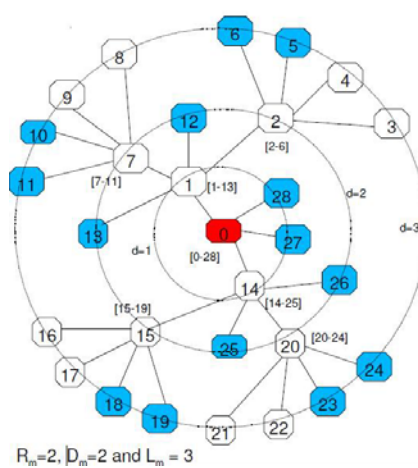
21 janvier 2013

ZigBee Routing

20

Allocation des adresses

- Router at depth d receives the range of addresses $[x, x + A(d)]$
- The router will have address x and it will assign
- Range $[x + (i-1).A(d+1)+1, x + i . A(d+1)]$ to its i^{th} router child where $1 \leq i \leq R_m$
- Address $x + R_m.A(d+1) + j$ to its j^{th} end-device child where $1 \leq j \leq D_m$
- Exemple, le second terminal du deuxième routeur de niveau 2 premier routeur de niveau 1 :
 - Son adresse est ... 11



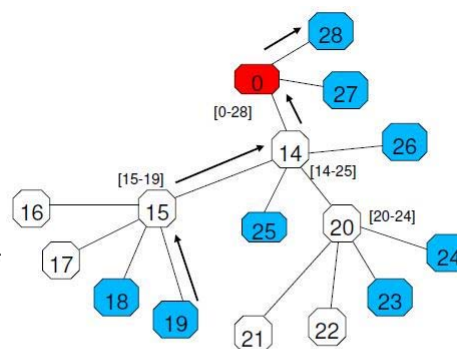
21 janvier 2013

ZigBee

21

Le routage arborescent

- Routing only along parent-child links
- Routers maintain their address and the address info associated with their children and parent
- Given an address assignment in tree based network, router can determine if the destination belongs to a tree rooted at one of its router children or is one of its end device children
 - If destination belongs to one of its children, it routes the packet to its appropriate child
 - If destination does not belong to one of its children, it routes the packet to its parent



Node 19 is sending a packet to Node 28

21 janvier 2013

ZigBee

22

Le routage arborescent

- Par exemple

- Le noeud 14:

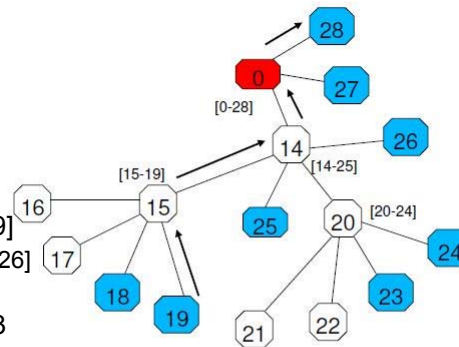
- Parent 0
 - Plage [15, 19] => 15
 - Plage [20, 24] => 20
 - Terminaux = {25, 26}

- S'il reçoit un message pour 29]

- 29 n'est pas élément de [14, 26]
 - Retranmis vers 0

- S'il reçoit un message pour 23

- 23 est élément de [20, 24]
 - Retransmis vers 24



Node 19 is sending a packet to Node 28

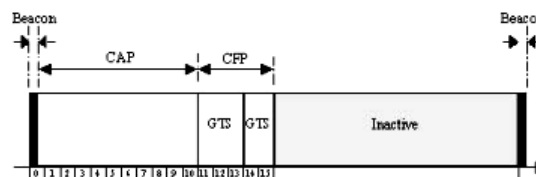
21 janvier 2013

ZigBee

23

IEEE 802.15.4 MAC Layer Superframe

- In a **superframe**, a dedicated network coordinator, transmits superframe beacons in predetermined intervals
 - Intervals as short as 15 ms or as long as 245 s
 - Slotted CSMA/CA is employed
 - Time between two beacons is divided into 16 equal time slots independent of the duration of the superframe
 - Time slots are split into contention access period (**CAP**) and contentionfree period (**CFP**)
- Guaranteed time slots (**GTS**) are concatenated contention free slots
 - Allow for low latency and dedicated bandwidth applications



21 janvier 2013

ZigBee

24

Problem with beaconing

- Beacon scheduling is necessary in a multihop topology to prevent the beacon frames of one device from colliding with either the beacon frames or data transmissions of its neighboring devices
- Only necessary in tree topology networks
- Idea is to have short active portions as compared to the beacon interval so, that neighboring routers can start their superframe suitably offset with respect to one other and avoid overlapping
- The density of devices that can be supported in the network depends on the length of inactive periods in superframe. The larger the length, the more devices that can transmit beacon frames in the same neighborhood

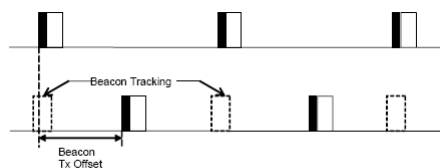


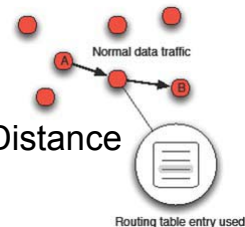
Figure 3.35 Parent-Child Superframe Positioning Relationship

21 janvier 2013

ZigBee

25

Routage maillé



- Basé sur AODV ("Ad hoc On Demand Distance Vector" routing algorithm)
- Chaque routeur possède une table de routage (RT)
- Un routeur utilise un algorithme de découverte des routes
 - Pour construire et mettre à jour cette table de routage
 - Une entrée de la table de routage :
<Destination address, Next hop address toward destination, Entry status (active, discovery, inactive)>
 - Quand un routeur doit acheminer un paquet vers une destination inconnue, il lance la procédure de découverte de routes (s'il a suffisamment de ressources, sinon il utilise le routage arborescent)

21 janvier 2013

ZigBee

26

Le format des trames de routage

- General frame
 - Frame control field
- Data frame
- Command frame
 - Command identifier field

Octets: 2	2	2	1	1	0/8	0/8	0/1	Variable	Variable
Frame control	Destination address	Source address	Radius	Sequence number	Destination IEEE Address	Source IEEE Address	Multicast control	Source route subframe	Frame payload
NWK Header									Payload
Bits: 0-1	2-5	6-7	8	9	10	11	12	13-15	
Frame type	Protocol version	Discover route	Multicast flag	Security	Source Route	Destination IEEE Address	Source IEEE Address	Reserved	

Command Name
Route request
Route reply
Route Error
Leave
Route Record
Rejoin request
Rejoin response
Reserved

Octets: 2	Variable	Variable
Frame control	Routing fields	Data payload
NWK header		NWK payload

Octets: 2	Variable	1	Variable
Frame control	Routing fields	NWK command identifier	NWK command payload
NWK header		NWK payload	

21 janv

ZigBee

27

Route Discovery Table

- Route Discovery Table (RDT) is maintained by routers and the coordinator to implement route discovery
- Attention : distincte de la table de routage

Field Name	Description
RREQ ID	Unique ID (sequence number) given to every RREQ message being broadcast
Source Address	Network address of the initiator of the route request
Sender Address	Network address of the device that sent the most recent lowest cost route request command frame corresponding to this entry's Route request identifier and Source address
Forward Cost	The accumulated path cost from the RREQ originator to the current device
Residual Cost	The accumulated path cost from the current device to the RREQ destination

Octets: 1	1	1	2	1
Command frame identifier (see Table 3.38)	Command options	Route request identifier	Destination address	Path cost
NWK payload				

21 janvier 2013

ZigBee

28

Link Cost

- Routing algorithm uses a path cost metric during route discovery
 - Based on LQI (Link Quality Indicator) value provided by 802.15.4 layers
 - An 8-bit integer ranging from 0x00 to 0xff. The minimum (resp. maximum) LQI values (0x00 and 0xff) should be associated with the lowest and highest quality IEEE 802.15.4 signals detectable by the receiver

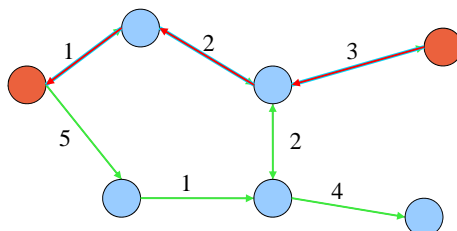
21 janvier 2013

ZigBee

29

Route Discovery

→ RREQ
→ RREP



Routage Zigbee

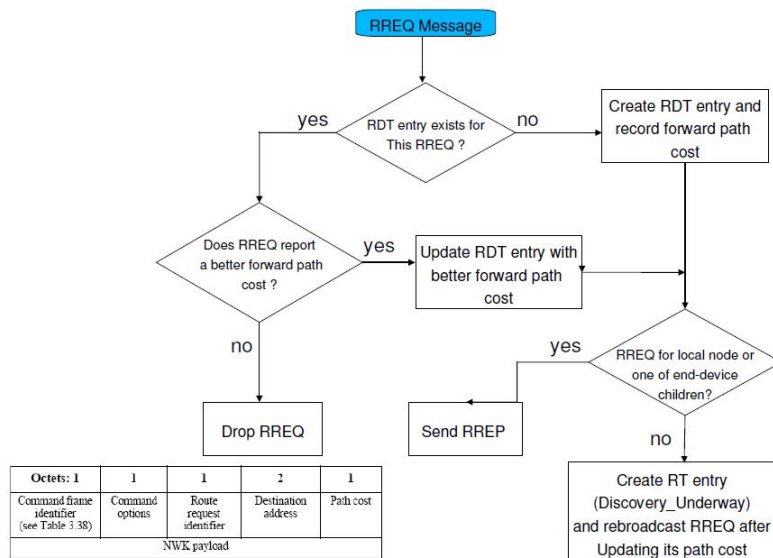
- Basé sur "Ad hoc On-Demand Vector Routing"
- Fonctionnement
 - Lorsqu'une source veut atteindre une destination, elle diffuse par inondation un "route request (RREQ)" jusqu'à atteindre la destination
 - Chaque routeur intermédiaire lorsqu'il reçoit un RREQ ne le propage que s'il propose une meilleure route
 - Il compare celui reçu avec le meilleur stocké dans la table de découverte de routes
 - Clef de recherche : Source add + RREQ ID + destination address,
 - Valeur comparée : Forward cost
 - La destination renvoie un "route reply (RREP)" sur le chemin de moindre coût (moindre Forward cost) vers la source
 - Lors de la réception d'un REP, les routeurs et la source mettent à jour leur table de routage à partir de la table de découverte de routes ("changement du status")

21 janvier 2013

ZigBee

31

Route Request Message Processing

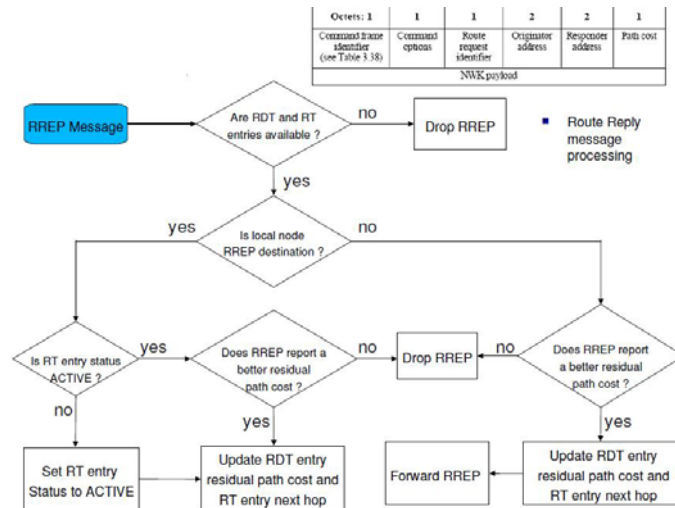


21 janvier 2013

ZigBee

32

Route Reply Message Processing



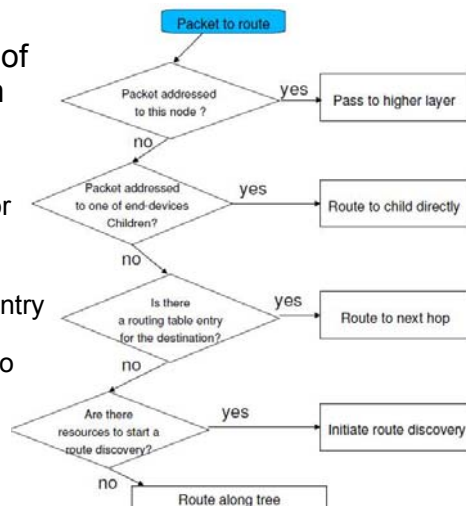
21 janvier 2013

ZigBee

33

Acheminement d'un paquet de données

- Simplified execution flow of the data routing algorithm
- A device is said to have routing table capacity if:
 - It is a ZigBee coordinator or ZigBee router
 - It maintains a routing table
 - It has a free routing table entry or it already has a routing table entry corresponding to the destination



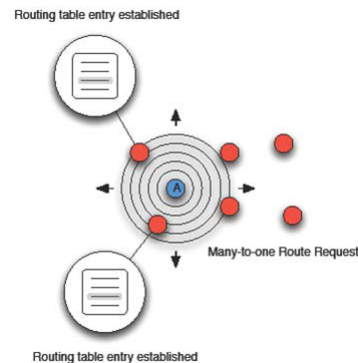
21 janvier 2013

ZigBee

34

Many-to-one routing

- Dans beaucoup de réseaux de capteurs, il existe un terminal spécifique, souvent appelé "sink"
 - Les autres équipements lui envoient régulièrement des données
- Pour supprimer la nécessité que chacun des autres équipements découvre individuellement le "sink", ZigBee propose un cas spécial de découverte de routes
 - Un RREQ unique, diffusé à partir du "sink", établit une entrée dans chaque routeur. Ce RREQ a pour adresse de destination celle du "sink".



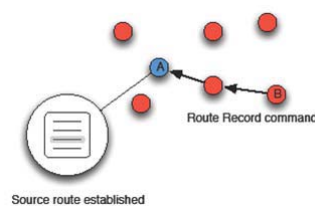
21 janvier 2013

ZigBee

35

Source Routing

- Les routeurs peuvent avoir des ressources limitées
 - Solution : le "Source Routing"
 - La route n'est pas mémorisée dans les tables de routage des routeurs mais incluse dans chaque paquet de données
- L'émetteur du paquet de données mémorise la route toute entière (mais seulement lui)
- Un message Record Route est envoyé par la source des données vers la destination. La destination lui retourne.
- Les paquets de données munis de ce chemin suivront la route indiquée en "Source Routing".



21 janvier 2013

ZigBee

36

Conclusion

- Zigbee
 - Low cost, Secure, Reliable and self healing, Flexible and extendable, Low power consumption, Easy and inexpensive to deploy, etc. !
 - Discutable
 - Si on envisage l'hétérogénéité des techniques et des supports
 - Si on veut être interconnecté à l'Internet
- Réseaux de capteurs et Internet
 - 6lowPAN
 - Routage Adhoc