

# Caracterització de l'error introduït per un sistema de mesura de distàncies basat en WLAN 802.11b

Gabriel Roca Perales  
EPSEVG

Febrer 2013

**Resum**—El Departament d'Enginyeria Telemàtica de la Universitat Politècnica de Catalunya ha desenvolupat un prototip anomenat *2-way TOA* que permet mesurar mitjançant IEEE 802.11 la distància que el separa d'un punt d'accés. Aquest prototip pot resultar de gran utilitat com a integrant d'un sistema de localització en interiors. Per a mesurar distàncies, el prototip *2-way TOA* mesura el RTT (*Round-Trip Time*; 'temps d'anada i tornada'), amb la peculiaritat que intercepta la trama a nivell 2 de la capa OSI, fet que minimitza l'afectació per part dels temps de processat de diferents elements del sistema. El projecte final de carrera que el present document resumeix analitza, mitjançant una campanya de mesures, com es comporta el prototip *2-way TOA* i comprova que es tracta d'un sistema de mesures factible.

**Paraules clau**—Estudi de variabilitat, posicionament en interiors, localització en interiors, ranging, lateració, RTT, RSS, IEEE 802.11b, Wi-Fi

## I. INTRODUCCIÓ

El Departament d'Enginyeria Telemàtica de la Universitat ha desenvolupat un prototip anomenat *2-way TOA* que permet mesurar mitjançant IEEE 802.11 la distància que el separa d'un punt d'accés conegut. Aquest prototip pot resultar de gran utilitat com a integrant d'un sistema de localització interior en ser utilitzat en una xarxa amb diversos punts d'accés i complementat amb un element que implementi un algorisme de localització. Per a mesurar distàncies, el prototip *2-way TOA* mesura el RTT (*Round-Trip Time*; 'temps d'anada i tornada') en cicles de rellotge; és a dir, l'interval de temps transcorregut des de l'instant que emet una trama de dades determinada fins que retorna la resposta procedent del punt d'accés, amb la peculiaritat que intercepta la trama a nivell 2 de la capa OSI, fet que minimitza l'afectació per part dels temps de processat dels diferents elements del sistema.

El projecte final de carrera que el present document resumeix té per objectiu caracteritzar de manera qualitativa, demostrant de manera empírica que els observables recollits reflecteixen el comportament físic esperat i fent un estudi de la variabilitat de les mostres, l'error introduït per el prototip *2-way TOA*. Per a la recollida de dades de camp, es disposarà el prototip a una sèrie de distàncies conegudes respecte al punt d'accés, s'iniciarà l'emissió de trames des del prototip i se'n recollirà els RTT. Així mateix, també es recollirà els RSS (*Received Signal Strength*; 'intensitat del senyal rebut') per tal de comprovar si aquest paràmetre podria complementar el RTT. La campanya es durà a terme amb 2 models diferents de punts d'accés i a 2 escenaris de característiques diferents, un de interior i l'altre exterior, amb la finalitat d'aconseguir una caracterització més completa. Posteriorment, les dades recollides es processaran amb l'ajuda de MATLAB, per

obtenir-ne diferents estimadors que permetin concloure l'estabilitat i l'error introduït pel prototip.

El present document s'estructura com s'indica a continuació. La secció II fa una breu introducció als sistemes de localització. La secció III descriu l'arquitectura del prototip *2-way TOA*. La secció IV descriu el sistema de mesures i la campanya de mesures realitzada. La secció V descriu quin ha estat el processament que s'ha aplicat a les dades recollides a la campanya de mesures i quins n'han estat els resultats. Finalment, la secció VI conclou el document i amb les conclusions sobre els resultats i el possible treball futur.

## II. INTRODUCCIÓ ALS SISTEMES DE LOCALITZACIÓ

La gran majoria de solucions que la humanitat ha anat trobant al problema de la localització utilitza un *mètode* en què el procés de posicionament es compon de 2 subprocessos:

Subprocés 1: mesurar o estimar determinats fenòmens *observables* en relació a alguns punts de referència de posició coneguda; aquests observables són dependents de la posició com, per exemple:

- El temps que triga un senyal en viatjar des de la posició incògnita fins al punt de referència, o
- La potència que perd un senyal en viatjar des de la posició incògnita fins al punt de referència, o
- L'angle d'arribada d'un senyal que viatja des de la posició incògnita fins al punt de referència

Subprocés 2: En segon lloc, calcular la posició incògnita mitjançant un *algorisme de posicionament* que utilitza com a dades d'entrada les mesures o estimacions del primer subprocés que, tal i com s'ha dit, guarden algun tipus de relació de dependència amb la posició.

Si ens fixem en els mètodes que entren les solucions telemàtiques (com la que és objecte d'estudi en aquest PFC), acostuma a haver-hi un "node a posicionar", del qual es vol conèixer la posició, i diversos "nodes de referència", de posició coneguda; i els observables del subprocés 1 s'obtenen de senyals que emet el node a posicionar i reben els nodes de referència, o viceversa.

A continuació es fa una descripció molt general dels diferents mètodes de posicionament utilitzats en solucions telemàtiques entrant en detall exclusivament amb 2 dels mètodes geomètrics (*ranging amb TOA* i *ranging amb RTT*), ja que aquests permetran entendre el funcionament del prototip *2-way TOA*.

### A. Mètodes geomètrics

Aquests mètodes utilitzen les propietats geomètriques dels triangles, les circumferències o les esferes per a calcular la posició del node a posicionar. N'hi ha 2 tipus: lateració i anulació.

### 1) Lateració o ranging

Com hem dit abans, en un primer pas, els mètodes de lateració mesuren o estimen la distància entre el node a posicionar i diferents nodes de referència, d'aquí que també s'anomeni mètode de *ranging* (terme anglès amb què es fa referència a qualsevol mètode per a mesurar la distància a què es troba un objecte; el terme és present al nom de diferents sistemes ben coneguts con, per exemple: el SONAR, *SOund Navigation And Ranging*; o el RADAR, *RADio Detection And Ranging*). Posteriorment, en un segon pas utilitzen aquestes distàncies per a calcular la posició del node a posicionar. Atenent a la manera d'aconseguir estimar les distàncies (que posteriorment s'utilitzaran per a calcular la posició), es poden diferenciar 4 mètodes: *ranging amb TOA*, *ranging amb RSS*, *ranging amb RTT* i *ranging amb POA*. Tot i així, per raons de brevetat, només descriurem els 2 mètodes més rellevants per al prototip.

a) *Lateració o ranging amb TOA* (Time of Arrival; 'temps d'arribada'): per estimar la distància entre el node a posicionar i cada un dels nodes de referència, aquest mètode aprofita el fet que aquestes distàncies són directament proporcionals al temps de propagació d'un senyal que viatgi entre ambdós nodes. Posteriorment, multiplicant aquest temps de propagació ( $t_{prop}$ ) per la velocitat de propagació del senyal en el medi, es pot obtenir la distància estimada que, finalment, mitjançant els diferents algorismes geomètrics permet calcular la posició del node.

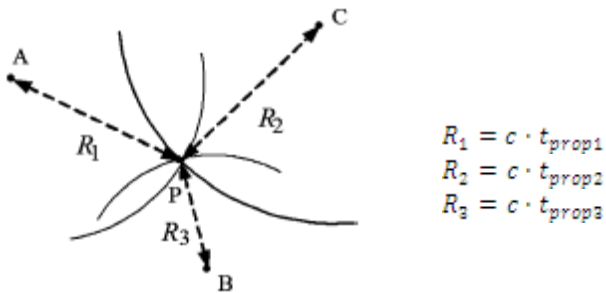


Fig. 1. Exemple de lateració o ranging amb TOA

En general, el ranging amb TOA presenta 2 dificultats:

- Tots els nodes (tant el node a posicionar, com els nodes de referència) han d'estar sincronitzats amb precisió. De no ser així, les distàncies estimades seran errònies i, en conseqüència, el càlcul de la posició també.
- El node emissor del senyal ha d'inserir una timestamp o marca de temps al senyal en el moment d'emetre'l, per tal que el receptor pugui estimar el temps de propagació i, a partir d'aquest, calcular-ne la distància.

b) *Lateració o ranging amb RTT* (RoundTrip Time of flight; 'temps de vol d'anada i tornada'): aquest és el mètode utilitzat pel prototip 2-way TOA. Aquest mètode és molt semblant al de lateració amb TOA, amb la diferència que estima el temps de propagació ( $T_{prop}$ ) a partir de la mesura del temps que triga el senyal en fer els camins d'anada i de tornada.  $T_{prop}$  s'estima com la meitat del RTT, sempre i quan el temps de processat ( $T_{proc}$ ) sigui menyspreable o gairebé constant i, per tant, negligible mitjançant calibració.

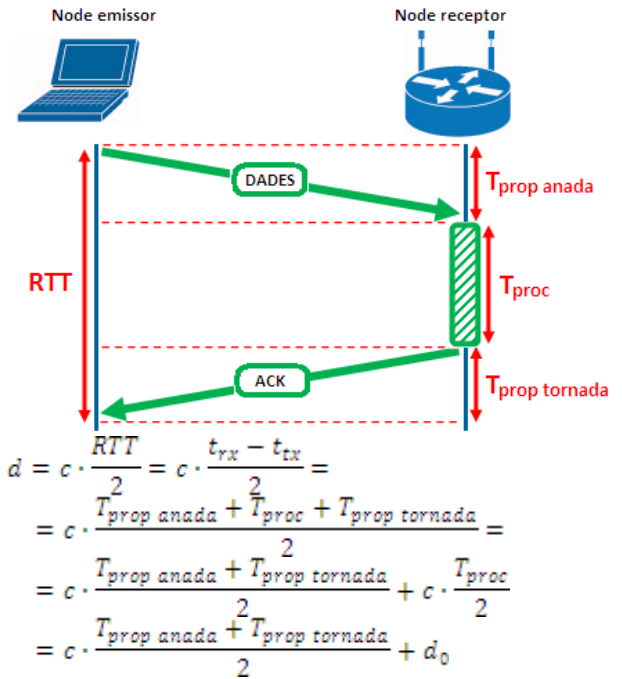


Fig. 2. Estimació de la distància,  $d$ , a partir del RTT

Com a avantatge respecte a la lateració amb TOA: no precisa de cap mecanisme de sincronisme entre rellotges, ja que tant l'instant d'emissió, com el de recepció del senyal es mesuren amb un mateix rellotge (el del node emissor).

Tot i així, com a contrapartida, la seva precisió depèn directament de la precisió en la estimació de ( $t_{rx} - t_{tx}$ ) i, per tant, en el fet que  $T_{proc}$  sigui negligible. Això afecta especialment als sistemes interior que utilitzen WLAN; ja que, en ser de curt abast, per ells,  $T_{proc}$  acostuma a ser molt major que  $T_{prop}$ .

### 2) Angulació

a) *Angulació amb AOA/DOA* (Angle o Direction Of Arrival; 'angle o direcció d'arribada'): a diferència dels mètodes geomètrics de lateració o ranging, el mètode geomètric d'angulació no calcula la posició a partir de l'estimació de distàncies, sinó d'angles. És a dir, en un primer pas, el mètode d'angulació amb AOA mesura o estima l'angle amb què arriba al node receptor (típicament, els nodes de referència; ja que els arrays d'antenes necessaris per a detectar l'AOA són cars) el senyal provinent del node emissor (típicament, el node a posicionar) i, posteriorment, en un segon pas utilitza aquests angles per a calcular la posició del node a posicionar.

Els avantatges d'aquest mètode són:

- Necessita pocs nodes de referència: per exemple, per a posicionar en 2D, tan sols necessita 2 nodes de referència.
- No requereix cap sincronització entre els rellotges dels nodes.

Els desavantatges:

- Requereix un hardware relativament gran, complex i car (antenes direccionals i arrays d'antenes).
- L'exactitud del posicionament empitjora a mesura que augmenta la distància entre nodes; ja que, per un determinat AOA, a major distància entre nodes, major arc i, en conseqüència, menor resolució.

### B. Anàlisi de l'escenari o fingerprinting

Aquest mètodes, abans d'arribar a la fase de producció (és a dir, a ser operatius), primer han de passar per una fase de calibració. És a dir, requereixen 2 fases o etapes temporals:

- Primer, en una fase offline, d'aprenentatge o calibració, el sistema construeix i memoritza un mapa de l'escenari, típicament, amb l'ajuda d'un operador que manualment va ubicant el node a posicionar en una sèrie de posicions conegudes de l'escenari i permetent que els nodes de referència en recol·lectin una sèrie de mostres de paràmetres (fingerprints) relacionables amb la posició (per exemple, la potència amb què arriba als diferents nodes de referència un senyal provinent del node a posicionar). Si l'escenari no pateix cap modificació significativa, aquesta fase només s'haurà de passar una única vegada; és a dir, durant la resta de la vida del sistema en aquest escenari, no caldrà torna a passar-se la fase de calibració.
- Posteriorment, el sistema ja entrarà en la fase online o de producció, on estima la posició del node a posicionar mitjançant un algorisme de casat que compara les mesures online amb el mapa de fingerprints offline

El principal repte d'aquests mètodes en entorns interior són la incorporació a l'escenari de qualsevol objecte (amb posterioritat a la fase de calibració) o el canvi d'ubicació de qualsevol dels diferents objectes que formin part de l'escenari; ja que, per culpa de la difracció, la reflexió i la dispersió que provoquen, en funció de la seva composició, mida, ubicació i orientació, poden tenir una afectació major o menor, o fins i tot invalidar totalment, el mapa de fingerprints que el sistema va memoritzar en la fase de calibració.

El component crucial dels sistemes de fingerprinting és l'algorisme de casat, ja que en determina tant la precisió i la latència. Hi ha 2 tipus d'algorismes: determinístics i probabilístics.

1) *Anàlisi de l'escenari amb mètodes determinístics*: en els algorismes determinístics, la intensitat de senyal rebuda en una determinada ubicació ve caracteritzada per un valor escalar; per exemple, la mitjana de RSS rebuts (Received Signal Strength; 'intensitat del senyal rebut') i s'utilitzen enfocaments no probabilístics per a estimar-ne la ubicació.

Un dels algorismes determinístics més emprats és el NNSS (Nearest Neighbour in Signal Space; 've més proper a l'espai de senyal'), que compara les els valors online de RSS amb els valors offline comparant la distància en l'espai de senyal (on, pel cas de WLAN, cada BSSID es tracta com una dimensió) i determina que la ubicació és la que minimitza aquesta distància.

2) *Anàlisi de l'escenari amb mètodes probabilístics*

Els algorismes probabilístics tenen en consideració tota la informació possible a l'hora de caracteritzar el RSS. De manera que incorporen informació addicional com, per exemple, historial de moviments. La caracterització del RSS és un punt important pel que fa a la precisió perquè la intensitat del senyal rebuda en un determinat punt no és constant; si no que varia amb diversos factors com, per exemple, canvis de temperatura i els efectes de la propagació del senyal de radio en entorns interior. És per aquesta raó que, prendre un únic valor escalar de RSS descarta informació important.

### C. Proximitat

Aquests mètodes proporcionen un posicionament relatiu. Acostuma a dependre d'una densa xarxa de nodes de referència de posició coneguda. Quan un node a posicionar és detectat per un únic node de referència, s'estima que el node a posicionar es troba a la mateixa posició que el node de referència. Quan més

d'un node de referència detecta un node a posicionar, s'estima que el node a posicionar es troba a la mateixa posició que el node de referència que rep una major RSS.

### III. PROTOTIP DE LOCALITZACIÓ 2-WAY TOA

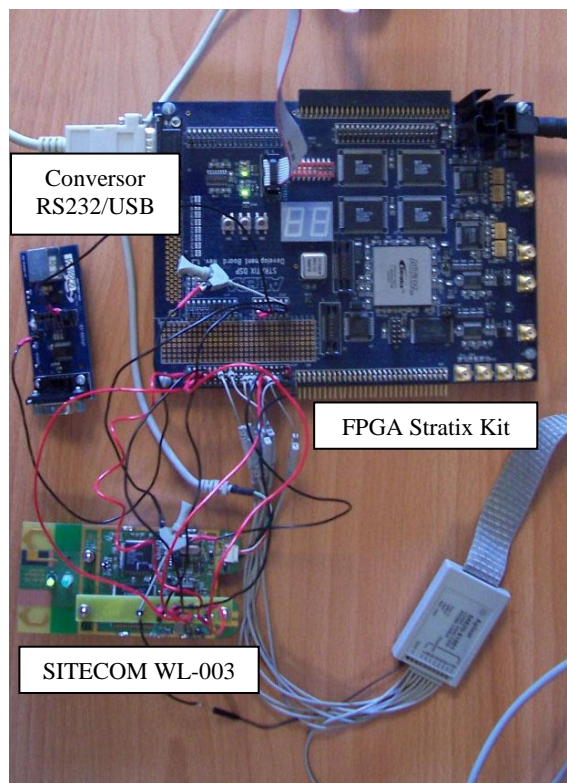


Fig. 3. Arquitectura del prototip 2-way TOA

El prototip 2-way TOA és un hardware dedicat a mesurar els RTT que triguen a viatjar per una xarxa WLAN determinades trames amb origen el propi prototip i destí un punt d'accés.

Per complir amb la seva comesa, el prototip inicia un comptador tan bon punt detecta, mirant dins la seva targeta WLAN, que la trama adreçada al punt d'accés ha sortit del chipset implementador de la capa d'enllaç de dades cap al chipset implementador de la capa física. De la mateixa manera, atura el comptador tan bon punt detecta que la trama de resposta ACK originada al punt d'accés i adreçada al propi prototip ha arribat a la targeta WLAN del prototip i ha sortit del chipset implementador de la capa física cap al chipset implementador de la capa d'enllaç de dades.

De manera que el prototip es pot utilitzar per a ranging basat en RTT i, en conseqüència, si s'utilitza conjuntament amb múltiples punts d'accés, es pot utilitzar en sistemes de localització mitjançant lateració basada en RTT.

Funcionalment, el prototip està format per 3 blocs:

- *Adaptador WLAN*: estableix la comunicació amb el punt d'accés. Es tracta d'una targeta de la marca Sitecom, model WL-003, compatible amb l'estàndard 802.11b. El desenvolupador del prototip va escollir aquesta targeta perquè la circuiteria que hi implementa la capa física (nivell 1 OSI) i la capa d'enllaç de dades (nivell 2 OSI) està formada per dos chipsets independents; fet que permet interceptar les dades a nivell 2, punxant la comunicació entre ambdós chipsets, i, per tant, reduir l'error en el càlcul de RTT respecte a d'altres prototips que fan aquesta lectura de dades a nivells més alts de la capa OSI.

- *Mesurador de RTT*: llegeix les trames enviades i rebudes per l'adaptador WLAN, detecta quines són pings i en computa el RTT. Es tracta d'una FPGA (Field Programmable Gate Array) de la marca Altera, el model Stratix, que, gràcies a la freqüència del rellotge que la governa i als PLLs que conté, permet realitzar la captura de les trames a una freqüència de 176 MHz, així com el còmput de RTT en cicles de rellotge de  $1/176 \mu s$ . En conseqüència, això permet un rang amb una precisió de 3,5 m aproximadament, una xifra optimista; tenint en compte que existeixen FPGAs molt més potents al mercat que, probablement, permetrien arribar a una precisió de 1 m. Funcionalment, aquest bloc es pot dividir en 3 subblocs:
  - El *comptador*, que, a partir dels senyals de start i stop generats per els altres dos subblocs, calcula el RTT.
  - L'*iniciador del comptador*, que genera el senyal start que inicia el comptador. Per fer-ho, descodifica les trames de sortida (és a dir, les que crea i emet la targeta Sitecom WL-003 del prototip) i, quan detecta que es tracta d'un ping amb destí el punt d'accés, genera la start. Així mateix, aquest bloc inclou un filtre que permet que es generi el senyal start exclusivament quan detecta que la trama porta encapsulat un paquet ICMP.
  - L'*aturador del comptador*, que genera el senyal stop que atura el comptador. Per fer-ho, descodifica les trames d'entrada i genera el stop quan detecta que es tracta de la ACK que el punt d'accés ha generat en resposta a la trama del prototip. En aquest cas, també s'hi ha afegit un filtre per a tenir en compte exclusivament les trames corresponents a les respostes ACK amb l'adreça MAC del punt d'accés com a origen i l'adreça MAC de la targeta Sitecom WL-003 del prototip com a destí.

- *Conversor RS232-USB*: la comunicació amb la FPGA mitjançant el protocol RS232 és molt fàcil d'implementar. Fer la comunicació mitjançant USB seria més complexa i no aportaria res, ja que la velocitat del RS232 és més que suficient per al propòsit del prototip. Tot i així, el port sèrie no està disponible en la gran majoria d'ordinadors actuals, on tendeix a desaparèixer; en canvi, al USB li passa tot el contrari. D'aquí que la necessitat del conversor RS232/USB.

#### IV. SISTEMA DE MESURES

El sistema de mesures està format per els següents components :

- Prototip de localització 2-way TOA
- Netbook ASUS EeePC
- Punts d'accés WLAN DWL-700AP (D-Link) i AIRONET 350 (Cisco)

A la Fig. 4 es mostra l'estructura del sistema amb les diferents connexions entre els seus components:

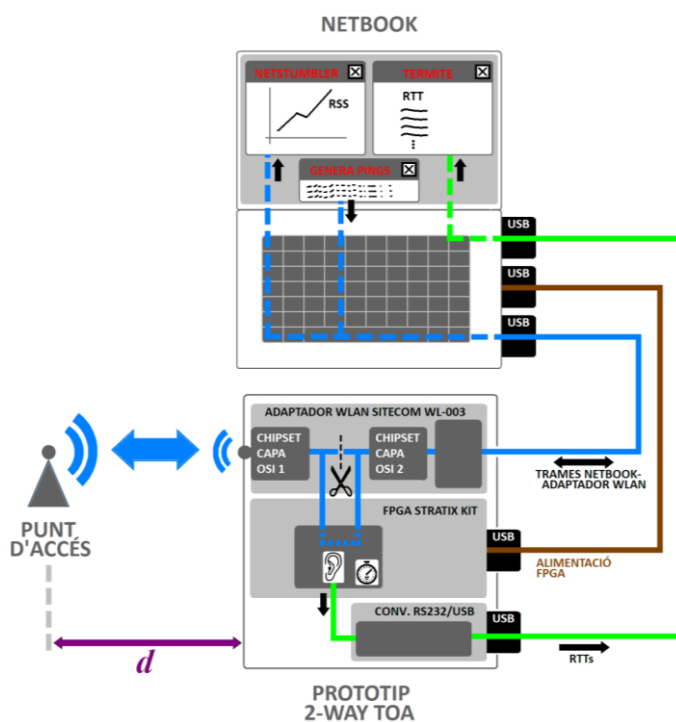


Fig. 4. Arquitectura del sistema de mesures

Les mesures s'han pres en 2 escenaris: Exterior\_LOS (davant de l'edifici C3 del Campus Nord) i Interior\_LOS (als passadissos centrals de les plantes 2 dels edificis A2 i A3 del Campus Nord).

S'ha decidit estudiar el comportament de l'error tant en escenaris interiors com exteriors. En la tria de l'escenari exterior, s'ha procurat trobar un escenari més proper al cas ideal, en què la reflexió, l'atenuació, l'efecte guia d'ones, etc. fos menor. En canvi, amb l'escenari interior es pretén posar a prova el prototip en un entorn més habitual, on els reflexos i la propagació multicamí són molt presents.

Els senyals multicamí són senyals que no es propaguen exclusivament a través del camí directe entre dos sensors, sinó també a través d'un o múltiples camins reflectits que provoquen interferències. Aquestes interferències poden ser destructives, si provoquen una atenuació del senyal, o constructives. A més, en sistemes de ranging basat en RTT o en TOA, com per exemple el del prototip subjecte d'estudi d'aquest PFC, aquests senyals poden afectar les mesures de tal manera que sembli que els sensors estan més allunyats del que realment estan i, en conseqüència, finalment, empitjorar la precisió en l'estimació de la posició.

Així mateix, s'ha decidit limitar l'estudi als escenaris LOS (*Line-of-sight*; és a dir, amb 'visibilitat directa' entre punt d'accés i prototip), ja que l'estudi de l'error en escenaris NLOS (*Non-line-of-sight*; és a dir, 'sense visibilitat directa' entre punt d'accés i prototip), per la seva diversitat, pluralitat i complexitat, supera l'abast del PFC.

Per a cada escenari i a diferents distàncies entre prototip i punt d'accés, es volen recollir mostres de 2 observables:

- RTT
- RSS (*Received Signal Strength*; 'intensitat del senyal rebut')

A partir d'aquestes variables, es pot estimar el valor de les diferents distàncies i, comparant aquestes estimacions amb els valors coneguts  $d$ , es podrà caracteritzar l'error introduït pel sistema de mesura.



A grans trets, per a estudiar l'error de mesura que introdueix el sistema, s'ha fet una campanya de mesures per a cada una de les quatre combinacions dels 2 escenaris i els 2 punts d'accés— en què s'ha situat el punt d'accés i el prototip a diferents distàncies conegudes i s'han recollit les diferents mesures fetes pel prototip. Com a màxim, en tots els casos, s'ha arribat fins als 45 metres, més enllà el prototip i el punt d'accés perdien la connectivitat cada pocs segons. La captura per a cada una de les distàncies ha durat aproximadament unes 2 hores i no s'ha fet més de 2 captures per dia. En haver-se de repetir tantes vegades com distàncies, punts d'accés i escenaris, la campanya completa s'ha dilatada diverses setmanes.

## V. RESULTATS

### A. Processament de les dades

El conjunt de dades recollides amb la campanya consisteix en un seguit d'arxius, 2 (RTT i RSS), per cada distància, escenari i punt d'accés. Cada un d'aquests arxius conté un vector amb les mostres recollides.

Per a poder-ne extreure conclusions, cada un d'aquests vectors de mostres recollides, un per un, es processarà amb l'ajuda de MATLAB i 2 funcions, *process\_measurements* i *confinterv*, el codi complet de les quals es pot consultar a la memòria del PFC. A més, cada un dels vectors es tornarà a processar 2 vegades més: una, dividint-lo en *slices* (és a dir, 'rodanxes' o 'talls') de 1000 mostres i, finalment, una altra dividint-lo en *slices* de 100 mostres. Dividint els vectors originals, es pot estudiar la variabilitat del sistema per a mostres més petites; es a dir, per exemple, per a mostres més curtes. Aquesta informació resulta d'interès en tant que, si es comprovés que, per a obtenir un *ranging* acceptable, cal mostrejar durant molta estona, això limitaria la latència del sistema de localització que s'implementés amb el prototip.

Com a sortida, les funcions retornen, entre d'altres dades, la mitjana, la mediana i els respectius intervals de confiança per al vector original sense filtrar, per al filtrat *segons el 30% de la mediana*, per al filtrat *segons el mínim de la mediana* i, finalment, per al filtrat *a 100 metres*. En aquest punt, convé parlar sobre els filtres:

- Filtrat *segons el 30 % de la mediana*: dins la funció, s'implementa mitjançant:

$$b = a(a > md\_a * 0.7 \ \& \ a < md\_a * 1.3);$$

on *md\_a* és la mediana de *a*. De manera que només deixa passar els valors del vector de mostres original *a* que cauen dins l'interval [70% de la mediana de *a*, 130% de la mediana de *a*]; és a dir, un 30% per sota i per sobre de la mediana de *a*.

- Filtrat *segons el mínim de la mediana*: dins la funció, s'implementa mitjançant:

$$c = a(a > md\_a - min\_a \ \& \ a < 2 * md\_a - min\_a);$$

on *min\_a* és el valor més petit del vector *a*. De manera que només deixa els valors del vector de mostres original *a* que cauen dins l'interval [*md\_a* - *min\_a*, *md\_a* + 2 \* *min\_a*]. És més restrictiu que el filtrat *segons el 30% de la mediana*.

- Filtrat *a 100 metres*: dins la funció, s'implementa mitjançant:

$$d = a(a \geq 26431 \ \& \ a \leq 26548); \text{ per al cas Cisco, i}$$

$$e = a(a \geq 26979 \ \& \ a \leq 27096); \text{ per al cas D-Link}$$

En ambdós casos, els filtres només deixen els valors del vector de mostres original *a* que cauen dins l'interval [valor positiu més petit de *a*, valor de RTT que s'esperaria si el prototip estigués situat a 100

metres del punt d'accés]. En un primer moment, aquest filtrat no existia; però es va afegir després de comprovar que els anteriors filtres, *segons el 30% de la mediana* i *segons el mínim de la mediana*, no eren capaços d'eliminar la gran quantitat d'outliers que contenen les mostres dels vectors originals. Els valors límit del filtrat a 100 metres s'han calculat de la següent manera:

$$distància = c \cdot (temps - temps_{mínim}) \quad (1)$$

$$distància = 100 \text{ metres} \quad (2)$$

$$temps = \frac{RTT}{2} \cdot \frac{1}{freqüència \text{ prototip}} = \frac{RTT}{2} \cdot \frac{1}{176 \text{ MHz}} \quad (3)$$

$$temps_{mínim \text{ CISCO}} = \frac{RTT_{mínim \text{ CISCO}}}{2} \cdot \frac{1}{176 \text{ MHz}} = \frac{26431 \text{ cicles}}{2} \cdot \frac{1}{176 \text{ MHz}} \quad (4)$$

$$temps_{mínim \text{ DLINK}} = \frac{26979 \text{ cicles}}{2} \cdot \frac{1}{176 \text{ MHz}} \quad (5)$$

D'on es resol:

$$RTT(d = 100 \text{ m})_{\text{CISCO}} = 26548 \text{ cicles}$$

$$RTT(d = 100 \text{ m})_{\text{DLINK}} = 27096 \text{ cicles}$$

On  $temps_{mínim \text{ CISCO}}$  és el menor RTT, convertit a temps, observat a 0 metres amb el punt d'accés Cisco. De la mateixa manera,  $temps_{mínim \text{ DLINK}}$  és el menor RTT, convertit a temps, observat a 0 metres amb el punt d'accés D-Link. Sabem que, per la pròpia limitació de l'estàndard 802.11, la distància entre prototip i punt d'accés no arribarà a 100 metres; de manera que hem establert un valor de RTT màxim esperable a 100 metres calibrant amb el RTT observat a 0 metres, que (en ser 0 la distància entre prototip i punt d'accés) es pot considerar que es deu exclusivament al temps de processat del punt d'accés i no està afectat per cap temps de propagació.

### B. Comportament de RTT

En el present document, en tractar-se d'un resum, només s'inclourà les gràfiques resultants de l'anàlisi amb el filtrat *a 100 metres* per a l'escenari interior. Les anàlisis amb la resta de filtres, que no han estat capaços d'eliminar gran part dels outliers, i per l'escenari exterior es poden consultar a la memòria del PFC.

Val a dir que, en cap dels escenaris s'ha aconseguit recollir mostres més enllà dels 45 metres, ja que, a partir d'aquesta distància, el prototip perdia la connectivitat amb el punt d'accés.

#### 1) Escenari: Interior, Cisco

Sorprenentment, a diferència del que ha succeït en els escenaris exteriors, inclús el filtrat menys restrictiu, *segons el 30% de la mediana*, ha estat capaç de filtrar els outliers.

En totes les anàlisis d'aquest apartat, s'observa que la tendència de RTT és creixent; tal i com cabia esperar, ja que el temps necessari per a viatjar entre nodes augmenta amb la distància. És més, llevat de molt poques excepcions, les gràfiques s'ha mantingut monòtonament creixents.

Pel que fa a l'impacte que han tingut les diferents mides de *slices* en les anàlisis, de fet, els resultats de les anàlisis sense *slices* i amb les diferents mides de *slice* no presenten diferències a destacar. És a dir, que, amb captures de 100 mostres, el sistema de mesures ha tingut un comportament tant

bo com amb captures de 1.000 o 10.000 mostres (la majoria de captures sense *slices* contenen aproximadament 10.000 mostres).

En general, la distància dels valors estimats respecte a la regressió lineal s'ha mantingut petita i constant.

Els valors de RTT per a 20 i 30 metres presenten una lleugera desviació (d'un màxim de 10 cicles de rellotge) respecte a la regressió lineal. Aquestes desviacions, si bé no són tan destacables, trenquen la desitjable monotonia que s'ha establert al llarg de la resta de distàncies.

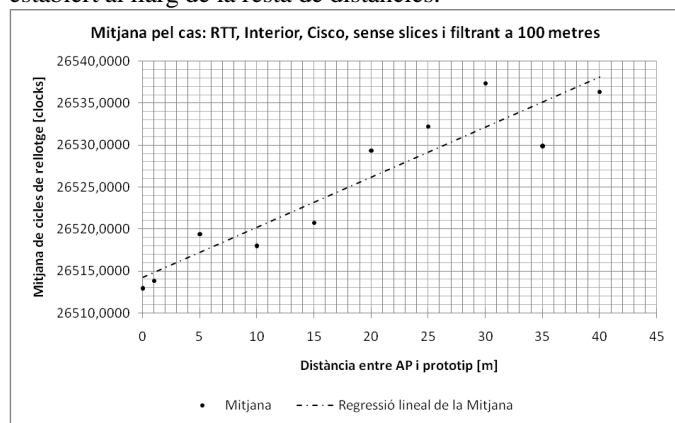


Fig. 5. Mitjana de RTT per a l'escenari interior Cisco, sense *slices* i filtrant a 100 metres

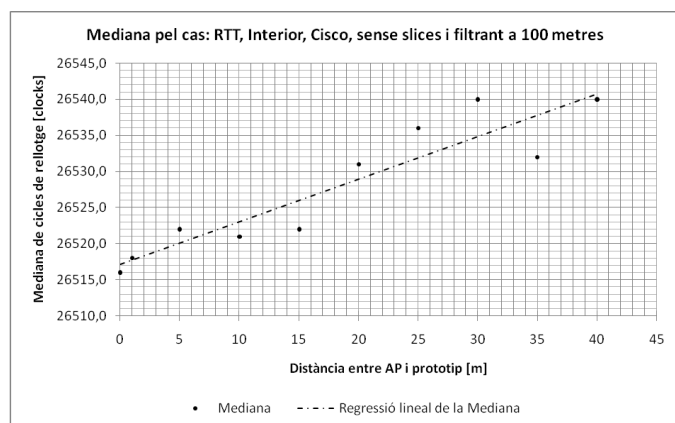


Fig. 6. Mediana de RTT per a l'escenari interior Cisco, sense *slices* i filtrant a 100 metres

A la TAULA I es pot comprovar com, per l'escenari interior Cisco, a partir dels 30 metres, el total de mostres que superen el filtrat a 100 metres pateix una clara davallada. Així mateix, a la TAULA II, es pot comprovar com ha succeït el mateix, encara que en menor mesura, per a l'escenari interior D-Link. Tenint en compte que ambdues campanyes es van realitzar en dies diferents, es raonable pensar que a partir de 30 metres l'escenari presenta alguna característica que provoca un gran increment d'*outliers*. De fet, a 30 metres l'escenari interior presenta una irregularitat: coincideix amb el passadís entre les 2es. plantes dels edificis A2 i A3 del Campus Nord. Tot i que el filtrat a 100 metres ha estat capaç de filtrar la gran quantitat d'*outliers*, els estimadors per a aquestes distàncies s'han desviat lleugerament de la resta.

TAULA I. TOTAL DE MOSTRES DE RTT DE L'ESCENARI INTERIOR, CISCO QUE SUPEREN EL 3R. FILTRAT A 100 METRES

Distància [m]	Total de mostres capturades	Total de mostres que superen el 3r. filtrat
0	11109	3717
1	10842	3496

Distància [m]	Total de mostres capturades	Total de mostres que superen el 3r. filtrat
5	12159	3089
10	11635	2879
15	11662	2386
20	10854	865
25	12159	1002
30	11109	301
35	12096	681
40	11705	329

## 2) Escenari: Interior, D-Link

Per a aquest escenari, el comportament del sistema ha estat molt semblant al de l'"Escenari: Interior, Cisco".

Per tant, de la mateixa manera que per a l'"Escenari: Interior, Cisco", els resultats de les anàlisis sense *slices* i amb les diferents mides de *slice* no presenten diferències a destacar. És a dir, que, amb captures de 100 mostres, el sistema de mesures ha tingut un comportament tant bo com amb captures de 1.000 o 10.000 mostres (la majoria de captures sense *slices* contenen aproximadament 10.000 mostres).

En totes les anàlisis d'aquest apartat, s'observa que la tendència de RTT és creixent; tal i com cabia esperar, ja que el temps necessari per a viatjar entre nodes augmenta amb la distància. És més, llevat de molt poques excepcions, fins a 30 metres, les gràfiques s'han mantingut monòtonament creixents.

Les mostres a 45 metres s'han pogut representar, però mostren resultats clarament aberrants, ja que els filtrats no han pogut eliminar part dels *outliers*.

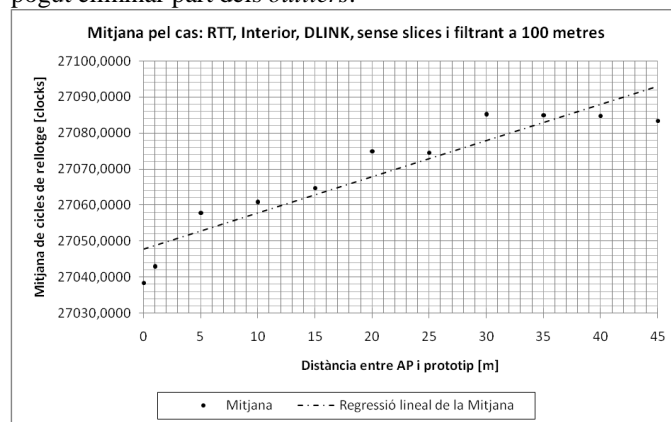


Fig. 7. Mitjana de RTT per a l'escenari interior D-Link, sense *slices* i filtrant a 100 metres

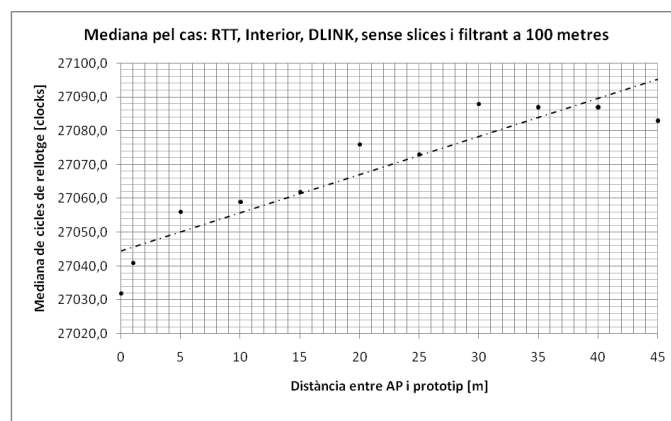


Fig. 8. Mediana de RTT per a l'escenari interior D-Link, sense *slices* i filtrant a 100 metres

A la TAULA II es pot comprovar com, per l'escenari interior D-Link, a partir dels 30 metres, el total de mostres que superen el filtrat a 100 metres pateix una davallada. Així mateix, a la TAULA I, es pot comprovar com ha succeït el mateix, encara que en major mesura, per a l'escenari interior Cisco. Tenint en compte que ambdues campanyes es van realitzar en dies diferents, es raonable pensar que a partir de 30 metres l'escenari presenta alguna característica que provoca un gran increment d'*outliers*. De fet, a 30 metres l'escenari interior presenta una irregularitat: coincideix amb el passadís entre les 2es. plantes dels edificis A2 i A3 del Campus Nord.

TAULA II. TOTAL DE MOSTRES DE RTT DE L'ESCENARI INTERIOR, D-LINK QUE SUPEREN EL 3R. FILTRAT A 100 METRES

Distància [m]	Total de mostres capturades	Total de mostres que superen el 3r. filtrat
0	13779	<b>13471</b>
1	11558	<b>11030</b>
5	11240	<b>10740</b>
10	11229	<b>8700</b>
15	11762	<b>7248</b>
20	11316	<b>6741</b>
25	12159	<b>7239</b>
30	11658	<b>3735</b>
35	11966	<b>5514</b>
40	11582	<b>4138</b>
45	3976	<b>24</b>

## VI. CONCLUSIÓ I TREBALL FUTUR

S'ha estudiat un prototip de posicionament mitjançant 2-way TOA en escenari exterior i interior, sota condicions de visibilitat directa.

Pel que fa a l'escenari exterior escollit, els resultat obtinguts no es poden considerar tant concloents com hagués estat desitjable. De l'escenari exterior, s'esperava poder fer una caracterització del prototip tan lliure d'efectes aliens al propi sistema de mesures com fos possible. No obstant, les mostres obtingudes a l'escenari exterior que es va escollir contenen gran quantitat d'*outliers*, tants que, en la majoria d'ocasions, arriben a constituir el 60% o 70% del total de valors capturats. Això ha fet que, un cop descartats els *outliers*, per la majoria de distàncies en l'escenari exterior, només es disposi d'unes 3000 mostres per cada distància; inclús, per a algunes poques distàncies han arribat a quedar menys de 100 mostres. De manera que, El fet de requerir un escenari obert, amb suficient longitud com per a poder realitzar l'estudi plantejat, ha resultat en la selecció d'un escenari en què no es tenia control ni sobre el trànsit de persones, ni sobre el nivell d'interferència rebut, ni sobre els elements físics disposats a l'entorn (fonts d'aigua, tanques metàl·liques, etc.). Aquests fets han motivat que un gran percentatge dels observables recollits hagin sigut anòmals i hagi calgut descartar-los, arribant a la situació que, per a distàncies més llargues, el número de mostres resultants del filtrat no puguin ser considerades estadísticament suficients. És

per això que se suggereix la selecció d'altres escenaris, on aquests elements no estiguin presents o bé estiguin sota control, entorn que difícilment es pot trobar als voltants del Campus Nord de la UPC.

Pel que fa a l'escenari interior, el nivell d'interferència és menor i el trànsit de persones està més controlat, ja que aquest, normalment, succeeix a ràfegues (quan hi ha entrades/sortides de classe). En conseqüència, els resultat han estat molt més concloents: és factible utilitzar el prototip per a la mida de distàncies. Si s'utilitza conjuntament amb el filtrat a 100 metres permet obtenir un estimador de la distància fins a 40 metres i, inclús amb captures de 100 mostres. Els RTTs observats han estat al voltant dels 30.000 cicles de rellotge; tenint en compte que el rellotge del prototip treballa a 176 MHz, si el sistema que emet les trames està a l'alçada pel que fa a la velocitat d'emissió de ràfegues, la latència esperable en l'estimació de la distància està al voltant dels 20 ms. No obstant, davant d'obstacles en l'escenari que han provocat severos augments dels *outliers*, el total de mostres vàlides s'ha arribat a reduir a un 2% del total de mostres capturades. De manera que, en aquests casos, la latència podria arribar a 1 s.

Potser hagués estat revelador haver modificat la metodologia seguida en la campanya de mesures: en lloc de concentrar la captura d'una o dues úniques distàncies en un sol dia, cada dia es podrien haver fet les captures per a totes les distàncies, encara que això impliqués que les captures fossin de durada curta. D'aquesta manera, si l'escenari patís alguna alteració puntual, l'afectació que pogués tenir aquesta alteració no esbiaixaria les observacions per a una determinada distància, sinó que probablement es "dissoldria" en totes les distàncies. Com a conseqüència, probablement s'hagués reduït el nombre de "graus de llibertat" a l'hora de fer hipòtesis davant els valor anòmals que contenen les captures.

## REFERÈNCIES

- [1] A. Neira, "Estudio y desarrollo de una solución software para un prototipo de localización utilizando WLAN". Barcelona: UPC. ETSETB, 2009.
- [2] M. Kjærgaard, "Radio Location Fingerprinting". Aarhus, Dinamarca: University of Aarhus. Department of Computer Science, 2010.
- [3] M. Ciurana, I. Martín Escalona, F. Barceló Arroyo, "Location in Wireless LAN," a *Location Based Services Handbook: Applications, Technologies, and Security*. EUA: CRC Press - Taylor and Francis Group, 2010, p. 620-640.
- [4] L. Hui, "Survey of Wireless Interior Positioning Techniques and Systems," a *IEEE Trans. On Systems, MAN, and Cybernetics—Part C: Application and Reviews.*, vol. 37, núm. 6, p. 1067-1080, nov. 2007.
- [5] G. Yanying, "A Survey of Interior Positioning Systems for Wireless Personal Networks," a *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 11, núm. 1, p. 13-32, 1r. trimestre 2009.
- [6] M. Ciurana, "Contributions to TOA-based location with WLAN". Barcelona: UPC. Departament d'Enginyeria Telemàtica, 2010.
- [7] J. R. Taylor, "An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements," 2a. ed. EUA: University Science Books, 1997.