

The Flooding Time Synchronization Protocol

FTSP

Célok:

- Alacsony sávszélesség overhead
- Node és kapcsolati hibák kiküszöbölése
 - Periodikus flooding (sync message)
 - Implicit dinamikus topológia frissítés
 - MAC-layer időbélyegzés
 - Clock skew becslés (lin. regresszió)
- Szinkronizációs hiba a μsec tartományban
 - Ami lényegesen jobb, mint az RBS és a TPSN

Idő szinkronizálás

Globális idő szükséges:

- Konzisztens elosztott működés
- Precíz irányítás
- Energia gazdálkodás
- Naplózás
- stb.

Egyéb megoldások

- NTP (Network Time Protocol)
 - Idő szerverek
 - GPS frissítés
 - Milisec pontosság
 - WSN-nek nemdeterminisztikussága miatt több száz milisec késleltetés
- RBS (Reference Broadcast Sync)
 - Referencia üzenet
 - Küldő oldali nemdeterminizmus kiküszöbölése
 - Lokális időbélyegekre külön üzenet kell
 - Nem kellőképpen skálázható

Egyéb megoldások II.

- TPSN (Timing-sync Protocol for SN)
 - Feszítő fa építése
 - Páros szinkronizálás a csúcsok mentén
 - Két sync-üzenet csere a szülővel
 - MAC-layer idő-bélyegzés
 - Kétszer jobb teljesítmény az RBS-nél
 - Nincs clock skew számítás
 - Nincs dinamikus topológia frissítés

Rádióüzenetek küldése

- Bizonytalan üzenetküldés
 - Kopetz és Ochsenreiter által bevezetett dekompozíció
 - Send Time
 - Access Time
 - Transmission Time
 - Propagation Time
 - Reception Time
 - Receive Time

- Send Time (küldési idő)
 - Üzenetek összeállítása és küldési kérés ideje
 - Függ az OS terheltségétől
 - Nemdeterminisztikus
 - Száz milisec nagyságrend
- Access Time (hozzáférési idő)
 - Várakozási késleltetés
 - Függ a hálózati forgalomtól
 - Nemdeterminisztikus
 - Milisec - sec nagyságrend
- Transmission Time (átviteli idő)
 - Üzenet küldéséhez szükséges idő
 - Függ az üzenet hosszától
 - Tíz milisec nagyságrend

- Propagation Time (propagációs idő)
 - A fizikai médiumban (adótól a vevőig) eltöltött idő
 - Csak a nodeok közötti távolságtól függ
 - Determinisztikus
 - < 1 milisec (300 méter alatti távolságra)
- Reception Time (fogadási idő)
 - Az üzenet vételéhez szükséges idő
 - Megegyezik az átviteli idővel (átfedés)
- Receive Time (vételi idő)
 - A fogadott üzenet feldolgozásához szükséges idő
 - Tulajdonságai hasonlóak a küldési időhöz

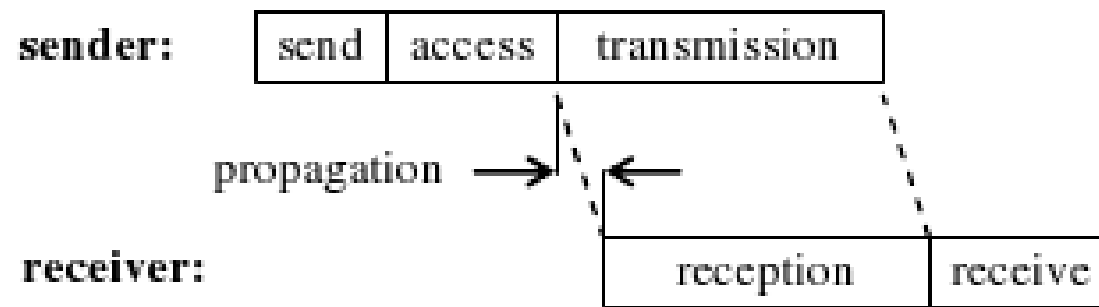


Figure 1. Decomposition of the message delivery delay over a wireless link.

- RBS

- Kiküszöböli a **send** és **access** időket
- Az OS-ben a **receive** is kiküszöbölhető
- Nem kell a OS alacsony szintjeit elérni

- TPSN

- Néhány platformon közvetlen elérhető a MAC
- MAC szintű idő-bélyegzés kiküszöböli a fenti három bizonytalanságot

- Az RBS és a TPSN sem küszöböli ki az átfedő **transmissiont** és **receptiont**

Propagációs folyamat

- Interrupt Handling Time

- Késleltetés a rádió és az MCU között
- Néhány μsec nagyságrend
- Interruptok tiltása esetén nagy lehet

- Encoding Time

- A bináris üzenet kódolása rádióhullámokká
- 100 μsec nagyságrend
- Determinisztikus

- Decoding Time

- Rádióhullámból bináris adat kinyerése
- 100 μsec nagyságrend
- Jelerősség és bit sync hibák növelhetik

Propagációs folyamat II.

- Byte Alignment Time

- Néhány rádió chip nem tudja megállapítani a byteok igazítási sorrendjét (alignment) ezért ezt szoftveresen kell megoldani
- Néhány 100 μ sec nagyságrend
- Számolható a bit offsetből és a rádió gyorsaságából

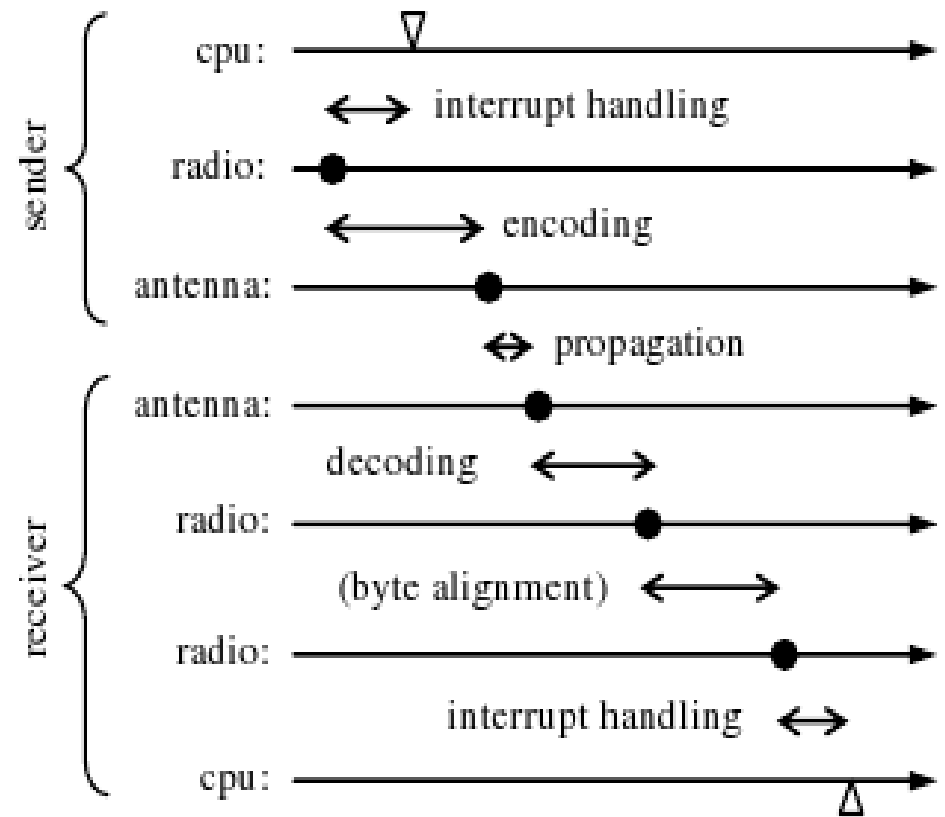


Figure 2. The timing of the transmission of an idealized point in the software (cpu), hardware (radio chip) and physical (antenna) layers of the sender and the receiver.

Célplatform: Mica2

- RBS hibaforrások
 - Propagáció
 - Dekódolás
 - Interrupt kezelés
- TPSN hibaforrások
 - Kódolás
 - Dekódolás
 - Interrupt kezelés
- Két legnagyobb hibaforrás
 - Interrupt kezelés
 - Dekódolás

Table 1. The sources of delays in message transmissions

Time	Magnitude	Distribution
Send and Receive	0 – 100 ms	nondeterministic, depends on the processor load
Access	10 – 500 ms	nondeterministic, depends on the channel contention
Transmission / Reception	10 – 20 ms	deterministic, depends on message length
Propagation	< 1 μ s for distances up to 300 meters	deterministic, depends on the distance between sender and receiver
Interrupt Handling	< 5 μ s in most cases, but can be as high as 30 μ s	nondeterministic, depends on interrupts being disabled
Encoding plus Decoding	100 – 200 μ s, < 2 μ s variance	deterministic, depends on radio chipset and settings
Byte Alignment	0 – 400 μ s	deterministic, can be calculated

Flooding Time Synchronization Protocol

- Lokális órák szinkronizálása a teljes hálózatban
- Lineáris regresszió a skew becslésére
- Multi-hop szinkronizáció
- Dinamikusan választott root node, mely nyilvántartja a globális időt
 - Topológiaváltozások dinamikus követése
 - Ad-hoc struktúrák kialakítása

FTSP: Idő bélyegzés

- Time-stamping
 - Szinkronizációs pont
 - Globális-lokális időbélyeg-pár
 - különbségük a clock offset

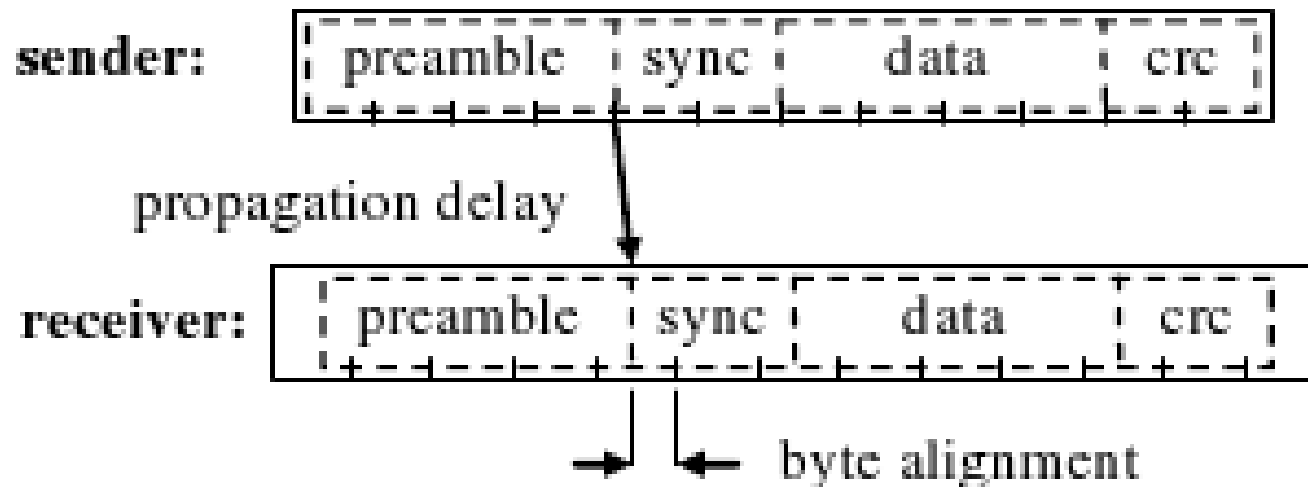


Figure 3. Data packets transmitted over the radio channel. Solid lines represent the bytes of the buffer and the dashed lines are the bytes of packets.

Idő bélyegzés II.

- A szinkronizálás folyamata
 - Több időbélyeg készítése byteonként
 - Normalizálás (byte küldés ideje miatt)
 - Interrupt jitter kiküszöbölése
 - A normalizált időbélyegek minimuma
 - Kódolás/dekódolás idejének kiiktatása
 - A fenti bélyegek átlaga
 - Vevő oldalon byte igazítási idő
 - Bit offset és átviteli idő
- már 6 időbélyeggel 1.4μsec precízió

FTSP: Óra eltérés (skew)

- Mica2-n akár $40\mu\text{sec}/\text{sec}$
 - Másodpercenként kellene szinkronizálni $1\mu\text{sec}$ nagyságrend eléréséhez
 - Sáv szélesség és energia többlet ezért
 - Clock skew offline becslése
- Lineáris regresszió használata
 - FTSP time-stamping kísérlet Mica2-n
 - Átlagosan $0.95\mu\text{sec}$ abszolút hiba
 - Maximálisan $4.32\mu\text{sec}$ abszolút hiba

Time-stamping kísérlet

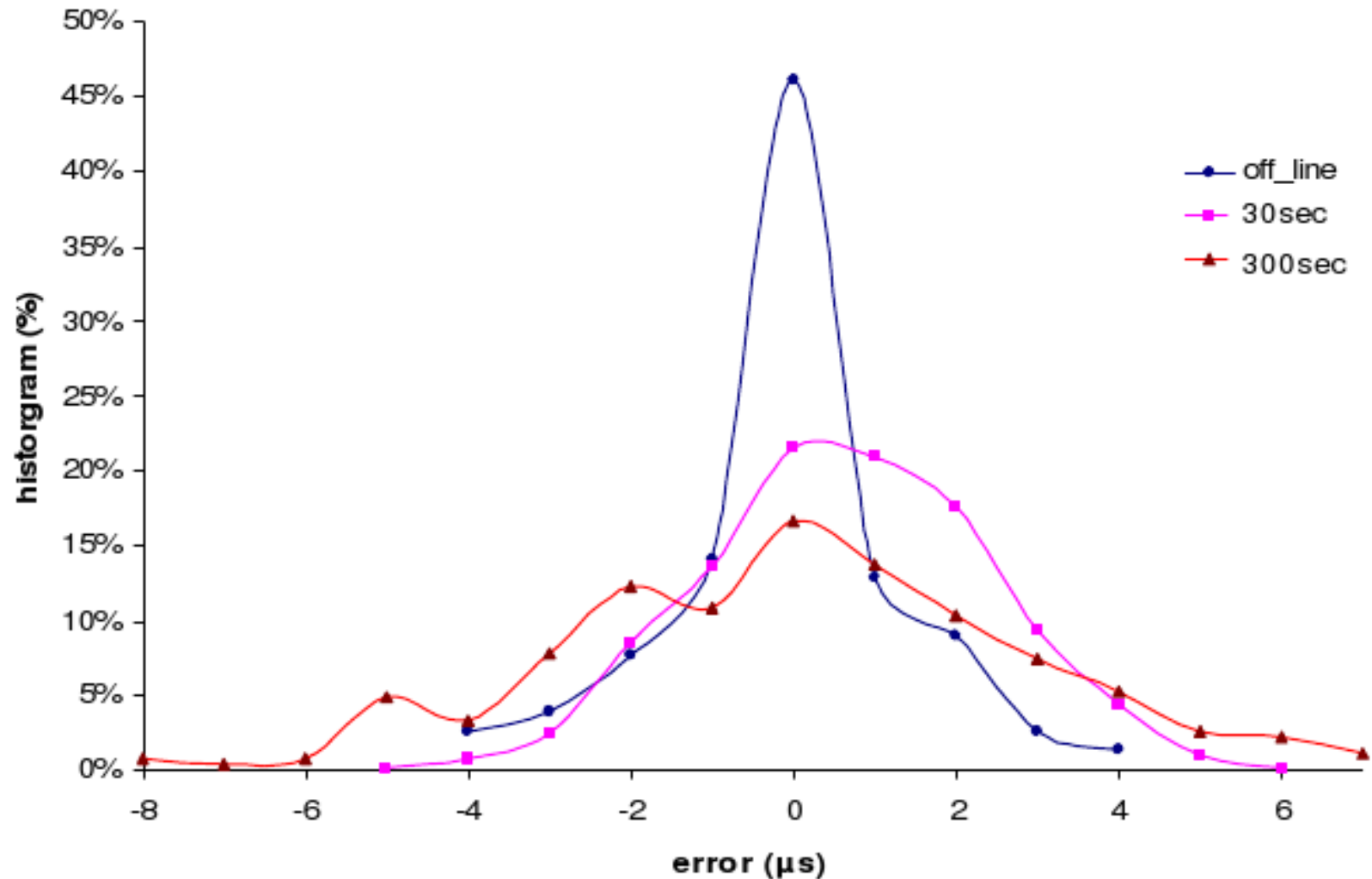


Figure 4. The distribution of the errors of linear-regression (LR): *off_line* refers to off-line LR, *30sec* refers to time sync interval $P=30\text{s}$, query interval 18s , and *300sec* refers to time sync interval $P=300\text{s}$, query interval 93s .

Szinkronizációs kísérlet

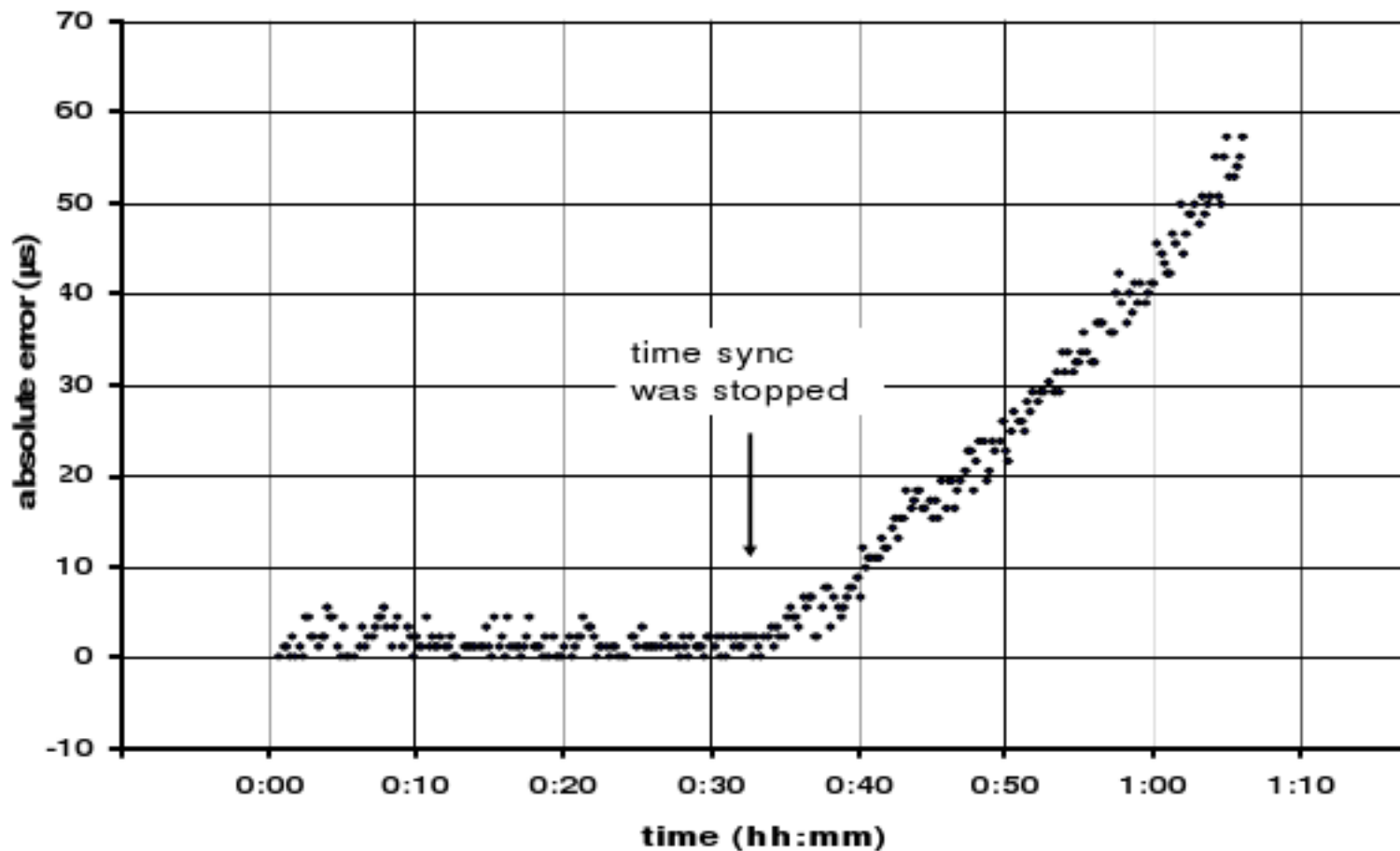


Figure 5. Time synchronization error between two motes. The time synchronization was stopped after 30 minutes. The initial small error of the skew estimate results in increasing synchronization error over time.

Multi-hop szinkronizáció

- Nodeonként egyedi azonosító (ID)
- Referencia pontok
 - Globális-lokális bélyegző pár
 - Periodikus broadcast segítségével
- Synchronization-root
 - Root dinamikusan választott
- Synchronized node
 - Több konzisztens referencia ponthoz szinkronizált node

FTSP: tulajdonságok

- Sync Message Format
 - TimeStamp
 - RootID
 - SeqNum
- Managing Redundant Information
 - 8 elemű regressziós táblából lin. regr.
- HighestSeqNum
- MyRootID
- Convergence properties
 - Propagációs idő
 - Szinkron-aszinkron probléma
 - Limitált gyorsaság

FTSP: root election

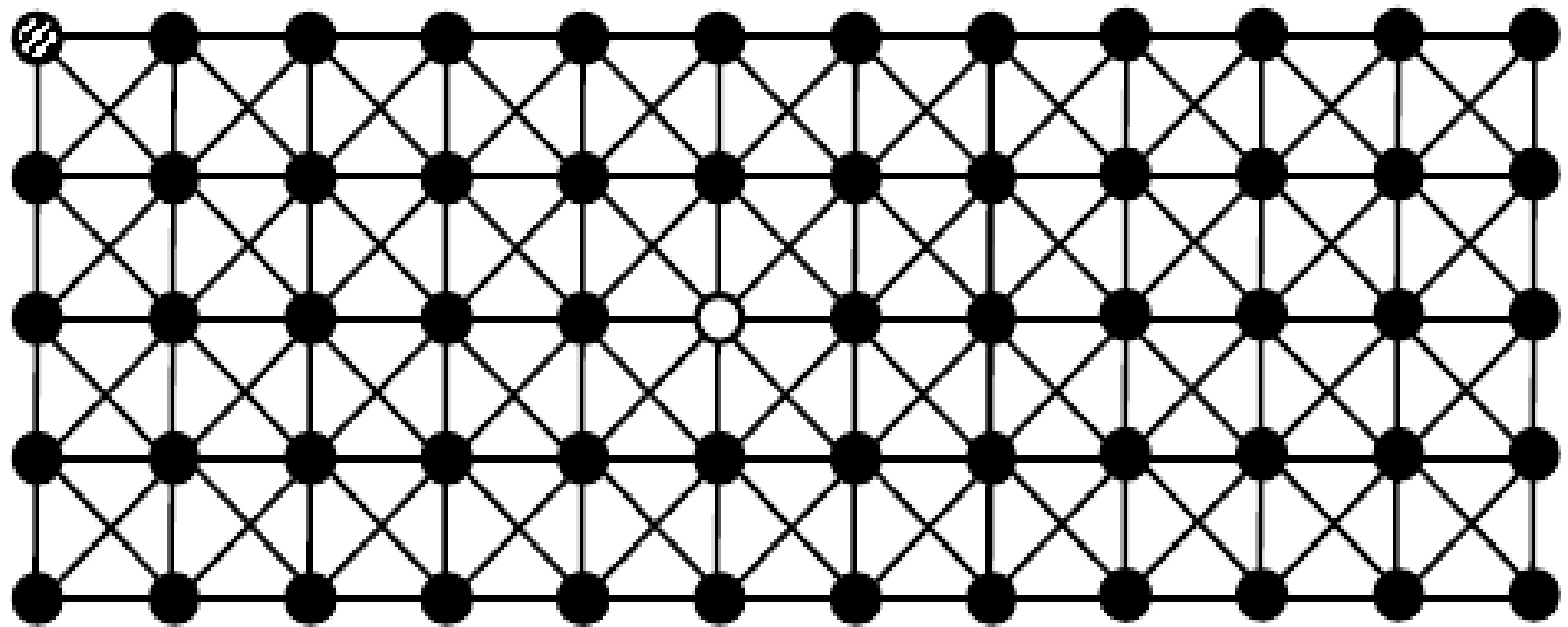
```
1 event Radio.receive(TimeSyncMsg *msg)
2 {
3     if( msg->rootID < myRootID )
4         myRootID = msg->rootID;
5     else if( msg->rootID > myRootID
6             || msg->seqNum <= highestSeqNum )
7         return;
8
9     highestSeqNum = msg->seqNum;
10    if( myRootID < myID )
11        heartBeats = 0;
12
13    if( numEntries >= NUMENTRIES_LIMIT
14        && getError(msg) > TIME_ERROR_LIMIT )
15        clearRegressionTable();
16    else
17        addEntryAndEstimateDrift(msg);
18 }
```

Figure 6. The handling of new synchronization messages.

```
1 event Timer.fired()
2 {
3     ++heartBeats;
4
5     if( myRootID != myID
6         && heartBeats >= ROOT_TIMEOUT )
7         myRootID = myID;
8
9     if( numEntries >= NUMENTRIES_LIMIT
10        || myRootID == myID ){
11        msg.rootID = myRootID;
12        msg.seqNum = highestSeqNum;
13        Radio.send(msg);
14
15        if( myRootID == myID )
16            ++highestSeqNum;
17    }
18 }
```

Figure 7. Periodic sending of synchronization messages.

Kísérlet



○ ID_1 – first leader

⊗ ID_2 – second leader

Figure 8. The layout and links of the experimental setup. Each node can only communicate with its (at most 8) neighbors.

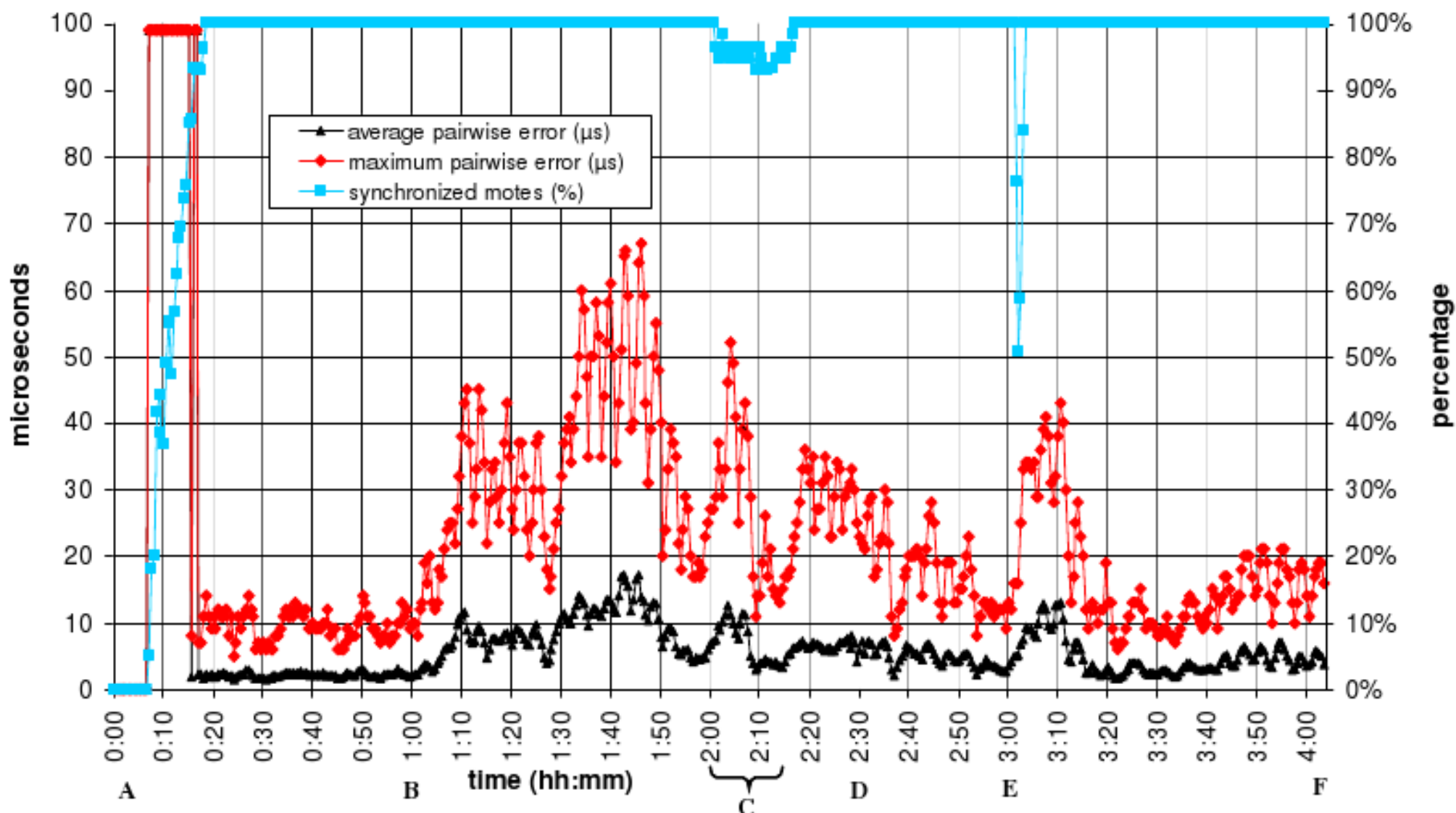


Figure 9. A 5x12 grid experiment shows the percentage of synchronized nodes, the maximum and average error (the maximum and average of the pairwise differences of the reported global times). The nodes were switched on at time A, the root ID₁ was switched off at B, randomly selected motes were reset during C, half of the motes were switched off at D, the same motes were switched back on at E, and the experiment ended at F.

Összehasonlítás

- RBS (reference broadcast)

- Hozzáférési és küldési idő eliminálása
- Random késleltetés kiszűrése
- Byte igazítási idő egyszerűen megoldható

- FTSP alacsony szintű időbélyegzői ezeket ugyanúgy kiküszöbölik

+ interrupt kezelésből adódó hibát is

- TPSN

- Hozzáférési, byte igazítási és propagációs idők kiszűrése
 - Implicit ACK
- Fejlettebb időbélyegzés, mint az RBS-nél
- Célplatform: Mica → implementációs nehézségek
- Mica2-n nem hatékony az implicit ACK (RX→TX)
- Kommunikációs overhead

Konklúzió

- RBS és TPSN 10 μsec nagyságrendű hiba ($7.4\mu\text{s}$ - $16.9\mu\text{s}$)
- FTSP 1 μsec nagyságrendű hiba ($0.95\mu\text{s}$ - $4.32\mu\text{s}$)
 - Jól skálázható multi-hop hálózatokra ($0.5\mu\text{s per hop}$)
 - Robusztus
 - Egyszerű