

# SAT reprezentációk vezeték nélküli szenzorhálózatokhoz

**Biró Csaba, Kusper Gábor**

*{birocs, gkusper}@aries.ektf.hu*

Eszterházy Károly Főiskola

## Absztrakt

A vezeték nélküli szenzorhálózatok nagyszámú, elsősorban olcsó szenzorokból állnak. Ezen rendszerek elsődleges célja a környezetből érkező adatok gyűjtése és továbbítása. Az egyes szenzorok üzenetszórással képesek kommunikálni a szórási tartományukon belüli szenzorokkal. Egy vezeték nélküli szenzorhálózatoknak számos követelménynek kell eleget tennie. Az egyik legfontosabb kérdés, hogy a szenzorok közötti mind-mind kommunikáció lehetséges-e? Cikkünkben bemutatunk két, a vezeték nélküli szenzorhálózatok reprezentálására alkalmas logikai modellt. A hálózat kommunikációs modelljéből és az elvárt viselkedést definiáló megszorításokból SAT problémákat generálunk, majd azokat SAT megoldók segítségével elemezzük. A mai modern SAT megoldók képesek akár több ezer változóból álló SAT problémák kielégíthetőségének vizsgálatára, így nagy szenzorhálózatok esetében is képesek rövid idő alatt eldönteni, hogy a modell a definiált követelményrendszernek (*pl. hibátűrés foka, energiafelhasználás*) eleget tesz-e.

**Kulcsszavak:** *vezeték nélküli szenzorhálózatok, RFID, SAT probléma, nulladrendű logikai modell*

## Abstract

In this article we introduce some logical models for wireless sensor networks (WSN). A WSNs are principally small, low-cost sensors. Their primary aim is the monitoring and controlling of physical environments. The sensors which can communicate with other nearby sensors by broadcasting messages. It is an interesting question whether the WSN has some important feature, like all-all communication is possible, or not. We can answer these questions by modeling the network and generating a SAT problem out of it. Modern SAT solvers can handle very large SAT problems even with thousands of variables, so we can verify even very large WSNs.

**Keywords:** *wireless sensor networks, RFID, SAT problem, propositional logic model*

Munkánk a *FutureRFID – Az RFID/NFC technológia továbbfejlesztési lehetőségei az “Internet of Things” koncepciói mentén TÁMOP-4.2.2.C-11/1/KONV-2012-0014* pályázat keretében készült az Eszterházy Károly Főiskola Matematikai és Informatikai Intézetében.

## Bevezetés

Az alacsony előállítási költségű, kisméretű és alacsony energiafelhasználású mikroelektronikus és elektromechanikus eszközök (Micro-Electro-Mechanical-Systems – MEMS) rohamos fejlődésének köszönhetően mára akár egy több ezer szenzorból álló vezeték nélküli szenzorhálózat (Wireless Sensor Networks – WSN) is könnyen és olcsón telepíthető, akár olyan helyeken is, amelyek nehezen megközelíthetők. Ezen hálózatok a szeizmikus tevékenységektől kezdve az akusztikus és radarjelek monitorozásán túl számos területen alkalmazhatóak. A szenzorok a hálózat csomópontjainak tekinthetők, képesek korlátozott mennyiségű információ feldolgozására, továbbá vezeték nélküli kommunikációra. Mára a vezeték nélküli szenzorhálózatok szerves részét képezik az utasítás (command), irányítás (control), kommunikáció (communication), számítástechnika (computing), intelligens (intelligence), felügyelet (surveillance), felderítés (reconnaissance) és célpontbemérés (targetting) eredeti rövidítésén C4ISRT rendszereknek [1, 2].

Szenzorok elhelyezése történhet a determinisztikustól a teljesen véletlenszerűig. A szenzorok végleges pozíciója nagymértékben függ az adott terület vagy épület tulajdonságaitól, többek között a tervezett telepítési helyek megközelíthetőségétől. Míg determinisztikus telepítés esetében a szenzorok a környezeti paraméterek, az alkalmazási terület figyelembevételével előre megtervezett helyekre kerülnek elhelyezésre, addig véletlenszerű (pl. repülőgépből történő) telepítés esetén a szenzorok végleges pozíciója előre nem ismert. További fontos jellemzőjük még ezen hálózatoknak a csomópontok típusa. Homogenitás szempontjából megkülönböztetünk heterogén és homogén szenzorokból álló hálózatokat [3].

A vezeték nélküli szenzorhálózatok egyik legkritikusabb pontja a hálózat hibatűrő képessége. A megfelelő szintű hibatűrés biztosítása érdekében számos kihívással kell szembenézni, ezek közül néhány, pl. energiaellátási problémák, hardware-es hibák, kommunikációs hibák/zavarok, rosszindulatú támadások. Napjainkban a legintenzívebben kutatott terület a szenzorok elhelyezésének optimalizálása, a hatékonyabb energiafelhasználás, kommunikáció és a megfelelő szintű hibatűrő képesség biztosításának érdekében.

## SAT probléma

A logikai kielégíthetőség (satisfiability) problémája alatt azt értjük, hogy valamely 0-rendű logikai formula változóihoz olyan hozzárendelést keresünk, amely mellett a formula igaz. SAT problémáról beszélünk, ha a formula speciálisan konjunktív normál formában van. A SAT probléma **NP**-teljes [4], azaz minden **NP**-nehéz probléma visszavezethető effektíven a SAT problémára. Ezért az informatika számos (logika, mesterséges intelligencia, áramkörtervezés) területén napjainkban is

intenzíven kutatott téma.

A mai modern CDCL SAT megoldó programok (pl. glucose, SATzilla, Lingeling, Minisat, ppfolio2012, PrecoSAT) a DPLL [4, 5] algoritmuson alapulnak. A DPLL egy teljes, visszalépéses keresésen alapuló algoritmus, amely két operátort használ, a unit propagálást (valamely unit egyetlen literáljának igazá tétele), illetve az elágazást (ha nincs unit, akkor valamely literálról felteszi, hogy igaz, ha backtrack-kel visszatér, akkor felteszi, hogy hamis). A DPLL legnagyobb előnye, hogy az összes változó kiértékelése előtt jó eséllyel megtalálja a megoldást. CDCL (Conflict-driven clause learning) azon elven alapul, hogy a konfliktusok felderítésével csökkenthető a keresési tér. Amennyiben talál egy konfliktust, elugrik abba az ágba, ahol az gyökerezik, majd elemzi a konfliktust (elégletes feltétel keresése - bizonyítás), ezután metszi azokat a területeket a keresési térben, ahol ez a feltétel teljesül [6].

## DIMACS CNF<sup>1</sup> és iCNF<sup>2</sup> formátumok

A konjunktív normál formában lévő kifejezéseket DIMACS CNF formátumban várják a SAT solver-ek. A formátum szabályrendszere egyszerű, a literálok pozitív vagy negatív egész számként vannak jelölve. A fájl minden egyes sora egy klóznak felel meg, amely sor végére nulla kerül.

A következő konjunktív normál formában lévő kifejezés esetén

$$F = (\neg x_1 \vee x_2 \vee x_3) \wedge (\neg x_2 \vee x_3 \vee x_4) \wedge (x_1 \vee \neg x_3 \vee x_4)$$

a DIMACS CNF a következő:

```
c      komment
p cnf 4 3   a problémát definiáló sor, első szám a változók a második pedig a klózik
            számát jelöli.
-1 2 3 0
-2 3 4 0
1 -3 4 0
```

Az iCNF a DIMACS CNF formátumon alapul, annyi különbséggel, hogy itt a klózik között vagy után *un.* feltevések (*assumptions*) helyezhetők el. Ezen sorok a betűvel kezdődnek és az utánuk lévő értékek itt a literálok diszjunkciója helyett, literálok konjunkcióját (*cube*) reprezentálják. A feltevéseket tartalmazó sorokat is egy 0 zárja.

A következő konjunktív normál formában lévő kifejezések esetén

$$F_1 = (x_1 \vee x_3) \wedge (\neg x_3 \vee x_1) \wedge \neg x_1$$

---

<sup>1</sup> DIMACS CNF formátum részletes leírása: [www.satlib.org/Benchmarks/SAT/satformat.ps](http://www.satlib.org/Benchmarks/SAT/satformat.ps)

<sup>2</sup> iCNF formátum részletes leírása: <http://archive.is/YJpK2>

$$F_2 = (x_1 \vee x_3) \wedge (\neg x_3 \vee x_1) \wedge (\neg x_2 \vee \neg x_5 \vee x_3) \wedge (\neg x_1 \vee x_2) \wedge x_5 \wedge \neg x_3$$

az iCNF fájl a következő:

```
p inccnf - a problémát definiáló sor, nem kell definiálni a literálok és a klózik számát.
1 3 0
-3 1 0
a -1 0
-2 -5 3 0
-1 2 0
a 5 -3 0
```

## Logikai modellek

### Definíciók

Jelöljük az ítéletváltozók halmazát  $\mathcal{V}$ -el.

**Definíció:** Az  $\mathcal{J}$  függvény a nulladrendű logika egy interpretációja akkor és csak akkor, ha  $\mathcal{J}$  minden ítéletváltozóhoz vagy az igaz, vagy a hamis értéket rendeli.

**Definíció:** Legyenek  $x_1, x_2, \dots$  ítéletváltozók az egyes szenzorok reprezentációi.

**Definíció:** Egy  $\mathcal{C}$  ítéletlogikai formulához  $\mathcal{J}$ -ben az alábbi  $|\mathcal{C}|^{\mathcal{J}}$ -val jelölt igazságértékeket és adott reprezentációtól függő jelentéseket rendeljük:

$|x_i|^{\mathcal{J}} \Rightarrow \mathcal{J}(x_i)$ , ahol atomi formula, azaz ítéletváltozó, amennyiben az interpretáció igaz értéket rendel hozzá, akkor a jelentése, hogy  $x_i$  szenzor működőképes, amennyiben az interpretáció hamis értéke  $i \in \mathbb{Z}$  és  $x_i$ -t rendel hozzá, akkor a jelentése, hogy  $x_i$  szenzor nem működőképes, vagy alvó állapotban van.

### 1. modell

A szenzorok egymás közötti kommunikációját logikai implikációval definiáljuk. Amennyiben az  $x_1$  szenzor képes üzenetet küldeni a  $x_2$  és  $x_3$  szenzoroknak a logikai modell a következőképpen írható le:

$$(x_1 \supset x_2) \wedge (x_1 \supset x_3).$$

A modell segítségével ellenőrizhető, hogy egy véletlenszerűen telepített szenzorhálózat egy adott állapotában a szenzorok (*amennyiben minden szenzor éber állapotban van*) közötti mind-mind kommunikáció biztosított-e? Ez gráfelméleti megközelítésből, a probléma kommunikációs gráfján értelmezve, arra a kérdésre ad választ, hogy a gráf összefüggő-e? Az első modell alkalmas, mind

globális, mind lokális tulajdonságok vizsgálatára.

Megvizsgáljuk, hogy az egyes szenzorok mely szenzorokkal képesek kommunikálni, előállítjuk a kommunikáció logikai modelljét és gráfját, majd definiáljuk a kommunikációval szemben támasztott követelményeket.

Amennyiben az így kapott modell

- kielégíthető, a szenzorhálózat nem felel meg a kommunikációs megszorításoknak,
- kielégíthetetlen, a szenzorhálózat megfelel a kommunikációs megszorításoknak és vizsgálható az egyes szenzorok kommunikációban betöltött szerepe.

Az 1. modell formális leírása:

$$M := \bigwedge_{i=1..n, j=1..n} \text{komm}(x_i, x_j)$$
$$\text{komm}(x, y) = \begin{cases} x \supset y, & \text{ha } x \text{ tud üzenetet küldeni } y \text{ - nak} \\ \text{igaz}, & \text{egyébként} \end{cases}$$
$$C := \bigwedge_{i=1..n, j=1..n} x_i \supset x_j$$

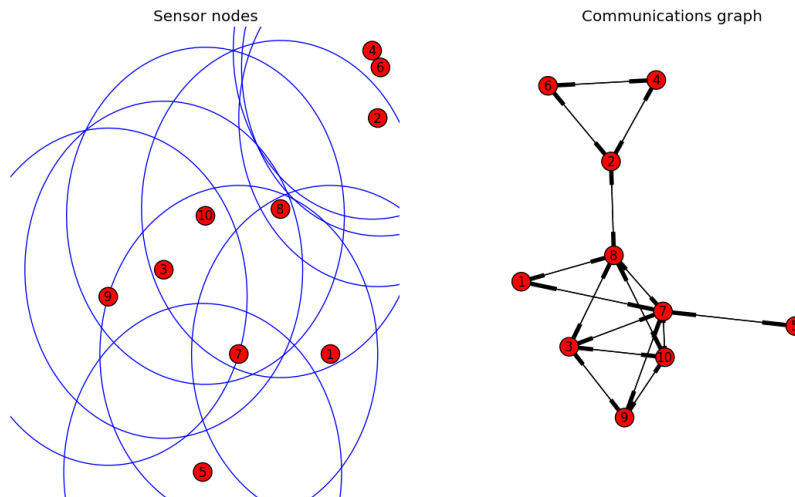
vagy

$$C := \bigwedge_{i=1..n, j=1..n} x_i \supset x_j, i \neq j$$
$$F := M \wedge \neg C$$

**Tétel:** Vegyünk egy véletlenszerűen telepített homogén vezeték nélküli szenzorhálózatot. Legyen  $M$  az ezt reprezentáló formula az 1. modell szerint. Legyen  $C$  egy az 1. modellben megfogalmazott kétféle cél közül az egyik, legyen  $F = M \wedge \neg C$ . Ekkor:

- Ha  $F$  SAT, akkor  $C$  nem igaz.
- Ha  $F$  UNSAT, akkor  $C$  igaz.

Példaképp nézzünk egy tíz szenzorból álló homogén véletlenszerű elrendezésű szenzorhálózat esetén a modell felépítésnek lépéseit és a kommunikációs megszorításokra adott válaszait.



1. ábra Homogén, véletlenszerű elhelyezésű szenzorhálózat és a kommunikációs gráfja

Az  $x_1$  szenzor kommunikációjának leírása:

$$(x_1 \supset x_7) \wedge (x_1 \supset x_8) \wedge (x_7 \supset x_1) \wedge (x_8 \supset x_1),$$

$$(\neg x_1 \vee x_7) \wedge (\neg x_1 \vee x_8) \wedge (\neg x_7 \vee x_1) \wedge (\neg x_8 \vee x_1).$$

DIMACS CNF formában:

```
p cnf 10
-1 7 0
-1 8 0
-7 1 0
-8 1 0
```

A modell az összes szenzor kommunikációját leíró klózik hozzáadásával lesz teljes.

Azon megszorításokat, amellyel arra kérdezhetünk rá, hogy bármely két szenzor közötti kommunikáció biztosított-e, a következőképpen definiáljuk:

```
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 0
-1 -2 -3 -4 -5 -6 -7 -8 -9 -10 0
```

Az így előállított DIMACS CNF formátumban lévő fájlt a MiniSat 2.2.0 teljes SAT solver-el vizsgáljuk, amely UNSATISFIABLE eredménnyel tér vissza, tehát a modell a követelményeknek megfelel, azaz a mind-mind kommunikáció biztosított.

## Lokális tulajdonságok vizsgálata

Amennyiben a kiinduló probléma kielégíthetetlen (UNSAT), tehát a mind-mind kommunikáció biztosított, vizsgálható az egyes szenzorok kommunikációban betöltött szerepe.

A szenzorokat egyesével kivesszük a modellből, majd a megmaradt szenzorokra vizsgáljuk, hogy biztosított-e még a mind-mind kommunikáció. Amennyiben a solver azt a választ adja a redukált modellre, hogy SAT, abban az esetben a vizsgált szenzor működése kiemelten fontos a hálózat teljes kommunikációját tekintve, azaz kiesésével nem biztosított a mind-mind kommunikáció. Jelentése gráfelméleti szempontból: az adott csúcs kivételével a kommunikációs gráf már nem összefüggő.

Példánkban az 2-es, 7-es és a 8-as szenzorok kiemelése esetén tért vissza SAT értékkel, tehát ezen szenzorok meghibásodása esetén a szenzorhálózat kommunikációja nem megfelelő.

## 2. Modell

A második modellel elsődlegesen a szenzorhálózat kommunikációs gráfjának belső szerkezetére fókuszálunk.

Ebben a modellben nem a kommunikációt írjuk, hanem azt hogy egy szenzor alvó vagy ébren állapotban van-e. Egész pontosan a modellt kielégítő interpretációból olvasható ki, hogy egy szenzor működik-e vagy sem. Ha az interpretáció egy szenzorhoz igaz értéket rendel, akkor működik, egyébként nem.

### Klikkek reprezentálása

A kommunikációs gráf felépítése után megkeressük az összes maximális méretű klikket, azaz az összes olyan részgráfot, ami teljes gráf. Ennek értelmében egy klikken belül olyan szenzorok helyezkednek el, amelyek mind tudnak egymással kommunikálni.

Az 1, 2, 3, 4 szenzorokból álló klikket (1, 2, 3, 4) karaktersorozattal jelöljük.

### Klikken belüli megszorítások reprezentálása

**Definíció:** Legyen adott egy  $n$  szenzorból álló klikk ( $n$ -klikk), egy  $n$ -klikk  $k$ -ad fokú kommunikációs megszorításán az  $n$ -klikk elemeinek  $k$ -ad osztályú ismétlés nélküli kombinációját értjük.

Egy  $n$ -klikk  $k$ -ad fokú kommunikációs megszorítás interpretációja: az  $n$ -klikkben legalább  $n-k+1$  szenzornak működni kell, a többi lehet alvó állapotban. Tehát az interpretációban legalább  $n-$

$k+1$  igaz hozzárendelésnek kell lennie.

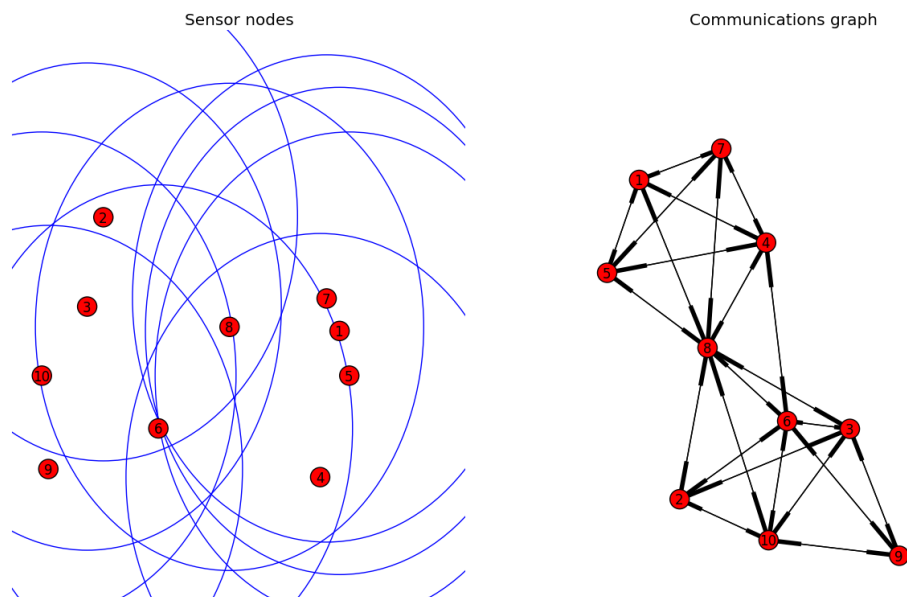
Egy klikkre megfogalmazható legerősebb kommunikációs megszorítás  $k=1$  estében áll elő, ami azt jelenti, hogy a klikken belül az összes szenzornak éber állapotban kell lennie.

Mi most továbbiakban  $k = 2$  esetében vizsgáljuk a problémát.

Egy 4 szenzorból álló klikk  $(1, 2, 3, 4)$  2-od fokú kommunikációs megszorítása:

1 2 0  
1 3 0  
1 4 0  
2 3 0  
2 4 0  
3 4 0

Példaképp nézzünk egy tíz szenzorból álló homogén, véletlenszerű elrendezésű szenzorhálózat esetén a modell felépítésnek lépéseit és a kommunikációs megszorításokra adott válaszait.



2. ábra Homogén, véletlenszerű elhelyezésű szenzorhálózat és a kommunikációs gráfja

A 2. ábrán látható szenzorhálózat kommunikációs grájából előállított klikkek:

$(8, 2, 10, 3, 6)$   
 $(8, 4, 1, 5, 7)$   
 $(8, 4, 6)$   
 $(9, 10, 3, 6)$



Az első klikk (8, 2, 10, 3, 6) 2-od fokú kommunikációs megszorítása.

8 2 0  
8 10 0  
8 3 0  
8 6 0  
2 10 0  
2 3 0  
2 6 0  
10 3 0  
10 6 0  
3 6 0

Egy adott szenzor vizsgálatakor, ki kell egészíteni a modellt, egy a csak a szenzort reprezentáló negatív literált (pl. -1 0) tartalmazó egy elemű klózzal.

### Követelmények definiálása

A követelményeket ehhez a modellhez feltevések formájában fogalmazzuk meg. A feltevések halmaza tartalmazza az *(előző modellben ismertett módon definiált)* összes lehetséges kommunikációt reprezentáló klózt.

Például:

a -1 2 0  
a -1 3 0  
a -1 4 0  
...

A feltevések száma

$$\binom{m}{2} - n^2, \text{ ahol}$$

$n$  a szenzorok száma,

$m = 2n$  figyelembe véve, hogy egy szenzort egy negatív és pozitív literál páros reprezentál.

Mivel itt csak a kommunikációt leíró állapotok érdekesek számunkra ezért  $\binom{m}{2}$ -ből kivesszük a modell vizsgálatakor nem értelmezhető eseteket. Ez a szám pontosan a szenzorok számának a négyzete.

Ez egy 10 szenzorból álló modell esetében a feltevések száma

$$\frac{20!}{2!(18)!} - 10^2 = 90.$$

Az így elkészített *icnf* fájlt az iMiniSat-al vizsgáljuk, amely képes az egyes feltevéseket külön-külön vizsgálni. Számunka az UNSAT esetek érdekesek, ugyanis ezek számából meghatározható, hogy a vizsgált szenzor, hány szenzorral képes közvetlen kommunikálni.

Az UNSAT esetek számát  $x$  -el jelölve, ez a következő összefüggéssel számolható ki

$$K(1) = \frac{x - (n - 1)}{n - 2},$$

ahol  $n$  a szenzorok száma.

Ez előzőleg ismertetett példa esetében, az első szenzort vizsgálva, az UNSAT esetek száma 41, az első szenzor tehát  $K(1) = \frac{41 - (10 - 1)}{10 - 2}$  értelmében 4 szenzorral tud közvetlenül kommunikálni.

### Modell kibővítése

A második modell kibővítésével úgy, hogy az egyes klikkekhez egy  $x > n$  negatív literált rendelünk, az is definiálható, hogy egy adott szenzor az egyes klikkekben lévő szenzorok közül mennyivel tud közvetlen kommunikálni. Ezzel tulajdonképpen elérhetővé válik, hogy bizonyos klikkeket ki és be kapcsolhassunk egy adott szenzor számára.

Az előzőekben definiált klikkek, kiegészítve a hozzájuk rendelt azonosítóval.

(8, 2, 10, 3, 6, -11)

(8, 4, 1, 5, 7, -12)

(8, 4, 6, -13)

(9, 10, 3, 6, -14)

Az első klikk (8, 2, 10, 3, 6, -11) 2-od fokú kommunikációs megszorítása, ekkor:

8 2 -11 0

8 10 -11 0

8 3 -11 0

8 6 -11 0

2 10 -11 0

2 3 -11 0

2 6 -11 0  
 10 3 -11 0  
 10 6 -11 0  
 3 6 -11 0

A nyolcas szenzort vizsgálva, csak az előző modellben ismertetett öt reprezentáló klózt  $(-8 \ 0)$  hozzáadva a modellhez az UNSAT esetek száma 73, tehát  $K(8) = 8$ .

Ehhez hozzáadva még a negyedik klikket azonosító pozitív egy elemű  $(14 \ 0)$  klózt, az eredmény nem változik, mert a nyolcas szenzor a negyedik klikkben nincs benne, tehát a benne lévő szenzorok az ő közvetlen kommunikációjában nem vesznek részt. Így semmilyen megszorítást nem jelent számára a klikk kikapcsolása.

A modellt kiegészítve a második klikket azonosító pozitív egy elemű  $(12 \ 0)$  klózzal:

-8 0  
 14 0  
 12 0

az UNSAT esetek száma 41, ami azt jelenti, hogy a második klikkben 4 szenzorral tud közvetlen kommunikálni.

Kiegészítve a második klikket azonosító pozitív egy elemű  $(13 \ 0)$  klózzal:

-8 0  
 14 0  
 12 0  
 13 0

az UNSAT esetek száma 49, ami azt jelenti, hogy a második és harmadik klikkben 5 szenzorral tud közvetlen kommunikálni. Látható, hogy a négyes szenzor mindkét klikkben benne van, de őt a kommunikáció szempontjából csak egyszer veszi figyelembe.

### **Következtetések, további munkák**

Cikkünkben bemutattunk két a szenzorhálózatok modellezésére alkalmas SAT reprezentációt. A első modell ereje, hogy akár több 10000 csomópontból álló szenzorhálózat esetében is képes gyors válasz adni arra kérdésre, hogy bármely két szenzor közötti kommunikáció biztosított-e, továbbá arra, hogy mely szenzoroknak kell egy riasztás esetében mindenképp éber állapotban lennie. A második modellel elsődlegesen a szenzorhálózat belső szerkezete vizsgálható. Mindkét modell alkalmas, mind globális, mind lokális tulajdonságok vizsgálatára. Továbbiakban vizsgáljuk, hogy milyen lehetőségeket nyújtanak a modellek szenzorok elhelyezésének optimalizálására, hatékonyabb energiafelhasználás és kommunikáció biztosításának érdekében.

## Hivatkozások

- [1] I.F. Akyildiz, W. Su\*, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci Wireless sensor networks: a survey  
Computer Networks 38 (2002) 393–422
- [2] Bolic, Miodrag, Simplot-Ryl, David Stojmenovic, Ivan (eds.) RFID Systems - Research  
Trends and Challenges 2010. 576 Pages, ISBN 978-0-470-74602-8 - John Wiley & Sons
- [3] A. Bharathidasan, V. A. S. Ponduru, Sensor Networks: An Overview-  
<http://www.eps2009.dj-inod.com>
- [4] S. A. Cook., The Complexity of Theorem-Proving Procedures. Proc. of STOC'71, pp. 151–  
158, 1971.
- [5] M. Davis, G. Logemann, D. Loveland., A Machine Program for Theorem Proving.  
Commun. ACM, vol. 5, no. 7, pp. 394–397, 1962.
- [6] A. Biere, M. Heule, H. van Maaren, T. Walsh, Handbook of Satisfiability. IOS Press,  
Amsterdam, 2009.
- [7] Radványi T., Biró Cs., Kuser G., Tajti T.: Szenzor hálózatok modellezése és vizsgálata  
nulladrendű logika segítségével, SzámOkt 2013 XXIII., pp. 147-153, 2013.
- [8] Cs. Biró, G. Kuser, T. Radványi, S. Király, P. Szigetváry, P. Takács, SAT Representation of  
Randomly Deployed Wireless Sensor Networks, ICAI-2014, megjelenés alatt.