



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék



Szinkronizációs eljárások vizsgálata 5G OFDMA rendszerekben IEEE specifikációk alapján

Önálló laboratórium beszámoló

Bálint Éliás

2024

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	2
1.1. Előző féléves munkám	2
1.2. Feladat rövid összefoglalása	2
1.3. OFDM és OFDMA	3
2. 5G architektúra	4
2.1. Rádiós Hozzáférési Hálózat	5
2.1.1. 5G NR keretstruktúra	5
2.2. Kiindulási pont	6
3. Szinkronizáció 5G NR rendszerekben	7
3.1. Szinkronizációs jelek	7
3.1.1. Primary Synchronization Signal	7
3.1.2. Secondary Synchronization Signal	7
3.2. Szinkronizáció PSS-sel	8
3.2.1. A vett jelek matematikai leírása	8
3.2.2. Szinkronizációs algoritmus	8
3.2.3. Magyarázat	9
3.3. SSS dekódolása	9
4. Szimulációs eredmények	10
4.1. Szimulációs környezet	10
4.2. PSS megkeresése	10
4.3. SSS dekódolása	10
4.4. Hibabecslés	10

1. fejezet

Bevezetés

1.1. Előző féléves munkám

A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Villamosmérnöki és Informatikai karán a villamosmérnök alapszak 5. félévében Témalaboratórium tantárgyat hirdetnek. Ez a tantárgy egy olyan projekt tárgy, amely a hallgatók számára lehetővé teszi, hogy valamilyen területen elmélyedjenek, és közösen dolgozzanak egy témavezetővel, ezzel tapasztalatot nyújtva számukra, a későbbi Önálló laboratórium és Szakdolgozat készítés tárgyakhoz.

Én az 5. félévemben a Témalaboratórium keretei között Dr. Horváth Bálint Péter témavezetésével folytattam egyéni munkát, amely során egy OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing - Ortogonális Frekvenciaosztásos Nyalábolás) rendszert modelleztem. A munka során Python nyelvben készítettem el egy digitális jelátvitel rendszer modelljét, amelyben az adót, a vevőt, és közöttük az átviteli csatorna volt a 3 legfőbb elem. Munkám során azt vizsgáltam, hogy miképp tud egy ilyen OFDM rendszer védekezni a többutas terjedés problémái ellen, milyen lehetőségek vannak a vett jel kompenzálására, vagy az átvitel minőségének mérésére.

Az eredmények részletes tárgyalása nem része ennek a dolgozatnak, de az eredményeket is és a tanultakat is felhasználtam a féléves munkámban.

1.2. Feladat rövid összefoglalása

A feladatom az volt, hogy az 5G OFDMA rendszerek szinkronizációs eljárásait vizsgáljam implementációs oldalról. Erre azért van szükség, mert a rendszert leíró szabványok csak a szinkronizációs jeleket specifikálják, vagyis azt, hogy mik a BS-ek által sugárzott szinkronizációs jelek, hogy hordozzák a megfelelő információt, azt már nem, hogy ezeket hogyan dekódolhatjuk UE oldalról.

A jelek dekódolása számítástechnikailag nem nehéz feladat, azonban a valóságban ezeket a jelátvitelt különböző frekvencia- és időhibák terhelik. Előbbi származhat az eszközök egymáshoz viszonyított mozgásából a Doppler hatásnak megfelelően, vagy a készülékek helyi oszcillátorából (ez jellemzően egy nagyobb hibát eredményez, ezért a munkámban ezt veszem figyelembe), míg utóbbi forrása a jelek terjedési ideje, valamint az, hogy a telefont nem tudjuk az OFDMA rendszerünkön belül értelmezett $t = 0$ időpillanatban bekapcsolni, ezért a mintavételezés nem azonos fázisban történik.

A készülék helyi oszcillátorának frekvenciahibáját megadhatjuk abszolút értékben ($\Delta f = 15$ Hz), megadhatjuk egy relatív egységben ($\Delta f = 50$ ppm - parts per million $= 10^{-6}$) vagy normalizált egységben is, amely azt jelenti, hogy a frekvenciahibát az alvivő

távolsághoz viszonyítva adjuk meg. A jelfeldolgozás szakirodalmában jellemzően ezzel érdemes számolni, mert így az eredmények összevethetők az 5G numerológiától függetlenül (5G numerológiának nevezzük a rendszer változtatható alvívótávolságát.).

1.3. OFDM és OFDMA

Az OFDM és az OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) rendszerek között egyetlen különbség van. Míg egy OFDM rendszerben egy adó és egy vevő közötti kommunikáció valósul meg több vivőfrekvencián, addig az OFDMA rendszerben a kommunikáció egy vagy több adó és egy vagy több vevő között valósul meg. Ez számomra nem volt evidens, a tanulmányaim során eddig a kettőt összemosták.

Az OFDM előnyeit könnyedén kihasználhatjuk többszörös hozzáférési rendszerekben is. Így nevezzük azokat a rendszereket, amelyekben egyszerre párhuzamosan több jelátvitel valósul meg. Ezt megtehetjük a frekvenciatartománybeli szétválasztással, lásd a GSM uplink és downlink kapcsolat, ahol két teljesen elkülönülő frekvenciatartományt vesz igénybe a kétfajta átvitel. Ugyanez a hatás elérhető, ha az átviteli médiumot valamilyen időosztásban osztjuk fel a felhasználók között. Van olyan módszer is, amellyel időben és frekvenciában is egyszerre oldhatjuk meg az ütközéseket, ha megfelelően kódoljuk az átvinni kívánt jelet.

2. fejezet

5G architektúra

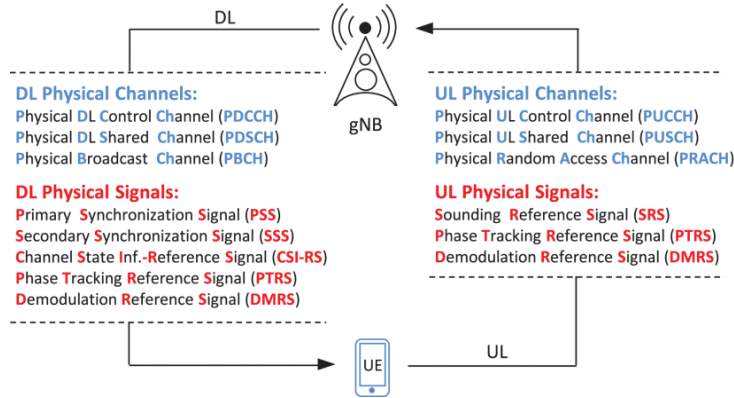
Az 5G architektúra az ötödik generációs mobilhálózati technológia alapját képezi, amely jelentős előrelépést jelent a korábbi generációkhoz képest, mind a sebesség, mind a kapacitás és a megbízhatóság tekintetében. Az 5G rendszer alapvetően három fő komponensből áll:

- Felhasználói Berendezések (User Equipment, UE): Ezek a végfelhasználói eszközök, mint például okostelefonok, táblagépek, és más, 5G-képes eszközök, amelyek csatlakoznak a hálózathoz.
- Rádió Hozzáférési Hálózat (Radio Access Network, RAN): Ez a hálózati komponens biztosítja a vezeték nélküli kapcsolatot a felhasználói berendezések és a központi hálózat között. Az 5G RAN magába foglalja a következő elemeket:
 - gNodeB (gNB): Ez az új bázisállomás, amely a rádió interfészt biztosítja a felhasználói eszközök számára.
 - Massive MIMO és Beamforming technológiák, amelyek javítják a hálózat kapacitását és hatékonyságát.
- Core Hálózat (Core Network, CN): Az 5G core hálózat a hálózat központi részét alkotja, amely az adatforgalom kezelését, a felhasználói autentikációt, és a hálózati szolgáltatások biztosítását végzi. Az 5G core hálózat a következő komponensekből áll:
 - User Plane Function (UPF): Az adatforgalom útvonalát kezeli.
 - Access and Mobility Management Function (AMF): A felhasználói eszközök mobilitását és hálózathoz való hozzáférését kezeli.
 - Session Management Function (SMF): A felhasználói adatszolgáltatásokat és azok konfigurációját kezeli.

Az 5G architektúra különlegessége, hogy támogatja a virtualizációt és a hálózati szeletelést (network slicing), amely lehetővé teszi, hogy különböző szolgáltatások és alkalmazások eltérő hálózati igényekkel különálló szeleteket kapjanak ugyanazon fizikai hálózaton belül. Ez növeli a hálózat rugalmasságát és hatékonyságát, biztosítva a különféle felhasználói esetek, mint például az autonóm járművek, az IoT eszközök és a nagy felbontású videostreaming igényeinek kielégítését.

2.1. Rádiós Hozzáférési Hálózat

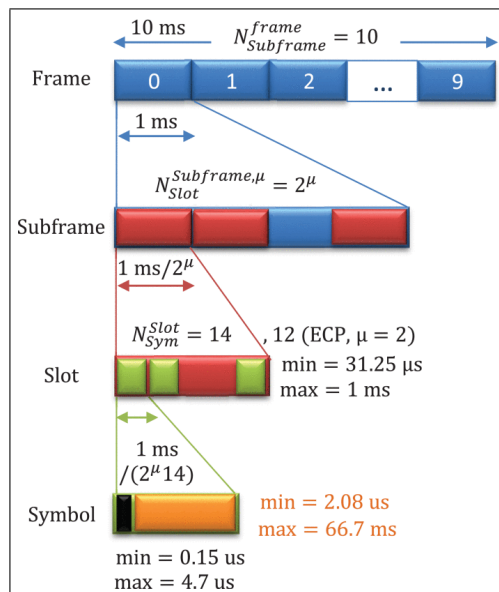
Az 5G hálózatok fizikai rétegének specifikációja a 3rd Generation Partnership Project (3GPP) nevű szervezet nevéhez kötődik. A szervezet felelős a mobil kommunikációs hálózatok egységesítéséért, fejlesztéséért és működtetéséért. Az új generációs ??????????



2.1. ábra. Az 5G NR fizikai csatornái és jelei

2.1.1. 5G NR keretstruktúra

az 5G NR keretstruktúrája $N_{Subframe}^{frame} = 10$ subframe-ből áll, amely közül mindegyik 1 ms idejű. Különbség az LTE hálózatokhoz képest, hogy egy 5G NR subframe változó számú slotot tartalmaz, amelyet az alkalmazott numerológia határoz meg (μ) a következő módon: $N_{Slot}^{Subframe,\mu} = 2^\mu$. Ennek megfelelően egy slot időtartama $t = \frac{1 \text{ ms}}{2^\mu}$. Végezetül minden slot tartalmaz 12/14 OFDM szimbólumot attól függően, hogy normál/kiterjesztett ciklikus előtagot alkalmaz a rendszer. Ebből következik, hogy egy OFDM szimbólum időtartama $t = \frac{1 \text{ ms}}{2^\mu 12}$ vagy $t = \frac{1 \text{ ms}}{2^\mu 14}$.



2.2. ábra. Az 5G NR keretstruktúrája

Mivel a rendszer OFDMA alapú, ezért frekvenciatartományban ún. Resource Blockokat (RB) definiál a 3GPP szabvány, mégpedig egy RB 12 egymást követő alvivőt foglal magába. Legyen Δf az alvivőtávolság: az 5G NR rendszerben Δf flexibilis, és az alkalmazott numerológiától függ. $\Delta f = 15 \text{ [kHz]} 2^\mu$.

2.2. Kiindulási pont

Tekintsük az alapállapotot. Ilyenkor minden kapcsolat stabil. Minden felhasználói készülék (User Equipment - UE) tudja, hogy milyen frekvenciacsoportban kommunikál melyik alállomással (bázisállomás). A készülékek nem mozognak és nem történik handover. Ebben az állapotban kapcsolunk be egy telefont. A bekapcsoló telefon értelemszerűen elkezd keresni a hálózatot, hogy létrejöhessen a kapcsolat, amelynek feltétele, hogy a telefon elvégezze a szinkronizációs lépéseket, és dekódolja, hogy melyik frekvenciákon kommunikálhat az alállomással.

3. fejezet

Szinkronizáció 5G NR rendszerekben

3.1. Szinkronizációs jelek

3.1.1. Primary Synchronization Signal

5G NR hálózatokban az elsődleges szinkronizáló jel a cella ID szektor ($N_{ID}^{(2)}$) dekódolására alkalmas az UE számára. A jel segítségével az UE meghatározhatja a mintavételezés frekvenciájának hibáját, és helyreállíthatja a későbbi jeleket vevőoldalon.

Az 5G-NR PSS három különböző 127 szimbólumú m-szekvenciából áll amelyek 127 alvivőt használnak fel. A 3 lehetséges m-sorozat a következőféleképp van definiálva:

$$d_{PSS}(n) = 1 - 2x(m) \quad (3.1)$$

ahol

$$m = [n + 43N_{ID}^{(2)}] \bmod 127 \quad (3.2)$$

$$x(i + 7) = [x(i + 4) + x(i)] \bmod 2 \quad (3.3)$$

illetve

$$[x(6) \ x(5) \ x(4) \ x(3) \ x(2) \ x(1) \ x(0)] = [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0] \quad (3.4)$$

3.1.2. Secondary Synchronization Signal

5G NR hálózatokban az másodlagos szinkronizáló jel a cella ID csoport ($N_{ID}^{(1)}$) dekódolására alkalmas az UE számára. Az SSS-t követően a UE oldalon kiszámítható a pontos Cella ID a következő módon: $N_{ID}^{cella} = 3N_{ID}^{(1)} + N_{ID}^{(2)}$.

Az 5G-NR SSS 355 különböző 127 szimbólumú gold-szekvenciából áll amelyek 127 alvivőt használnak fel. A 355 lehetséges gold-sorozat a következőféleképp van definiálva:

$$d_{SSS}(n) = [1 - 2x_0([n + m_0] \bmod 127)][1 - 2x_1([n + m_2] \bmod 127)] \quad (3.5)$$

ahol

$$m_0 = 15 \left\lfloor \frac{N_{ID}^{(1)}}{112} \right\rfloor + 5N_{ID}^{(2)} \quad (3.6)$$

$$m_1 = N_{ID}^{(1)} \bmod 112, 0 \leq n < 127 \quad (3.7)$$

$$x_0(i+7) = [x_0(i+4) + x_0(i)] \bmod 2 \quad (3.8)$$

$$x_1(i+7) = [x_1(i+4) + x_1(i)] \bmod 2 \quad (3.9)$$

$$[x_0(6) \ x_0(5) \ x_0(4) \ x_0(3) \ x_0(2) \ x_0(1) \ x_0(0)] \quad (3.10)$$

$$= [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1] \quad (3.11)$$

illetve

$$[x_1(6) \ x_1(5) \ x_1(4) \ x_1(3) \ x_1(2) \ x_1(1) \ x_1(0)] = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1] \quad (3.12)$$

3.2. Szinkronizáció PSS-sel

A Témalaboratórium tárgy keretei között egy OFDM rendszer előnyös tulajdonságaival foglalkoztam egy egyvívós modulációs rendszerrel szemben. Az OFDM egyik előnye, hogy úgynevezett pilot-vívók (segédvívók) segítségével a vevőoldalon hatékonyan tudjuk becsülni a csatorna átviteli karakterisztikáját, amellyel a vett jelet kompenzálni tudjuk. Másik előnye az OFDM-nek, hogy ciklikus előtagot alkalmaz, vagyis minden szimbólum végét az elejére másolja a védőidő helyére, ez a szimbólumváltás tranziensét hivatott csökkenteni, azonban az OFDM szimbólumok kezdetét is megtalálhatjuk, ha a vett jelben ismétlődéseket keresünk.

Az 5G NR rendszerben a vevő szinkronizációja a megadott szinkronizációs jelek (PSS és SSS) dekódolásával történik. A felhasználói készülék ezeket a jeleket felhasználva képes a hálózatra kapcsolódni.

3.2.1. A vett jelek matematikai leírása

Legyen $r(n)$ egy ideálisan vett és mintavételezett jel vevőoldalon.

$$r(n) = s(n) * h(n) + w(n) \quad (3.13)$$

$$r_\epsilon(n) = [s(n) * h(n) + w(n)] \exp\left(\frac{j2\pi n}{N_{FFT}} \epsilon\right) \quad (3.14)$$

ϵ a normalizált frekvenciahiba, amelyet egész és tört komponensekre tudunk bontani.

3.2.2. Szinkronizációs algoritmus

Mivel ϵ egészrésze valójában egy egészzel való eltolást okoz a vett jel időtartományi reprezentációjában, ezért azt könnyen figyelmen hagyhatjuk. Legyen $\hat{\theta}$ a PSS-hez tartozó időpont becslője, \hat{i} pedig cella ID szektor becslője ($\hat{i} \in 0, 1, 2$).

Ezt a két ismeretlent a következő módon becsülhetjük:

$$(\hat{\theta}, \hat{i}) = \operatorname{argmax}(C(\theta, i)) \quad (3.15)$$

Ahol $C(\theta, i)$ a keresztkorrelációt jelöli, mégpedig:

$$C(\theta, i) = \frac{\left| \sum_{k=0}^{N_{\text{FFT}}-1} r(\theta + k) p_i^*(k) \right|}{\sum_{k=0}^{N_{\text{FFT}}-1} |r(\theta + k)|^2} \quad (3.16)$$

Ahol $r(\theta + k)$ a vett késő jelet jelöli, $p_i(k)$ az i -edik cella ID szektor PSS jelének időtartománybeli alakja, N_{FFT} pedig a CP nélküli mintaszám. Ebben az esetben a frekvencia törtrészére a következő becslést adhatjuk:

$$\hat{\epsilon}_F = \frac{1}{\pi} \angle \left(\left[\sum_{k=0}^{N_{\text{FFT}}/2-1} r(\hat{\theta} + k) p_i^*(k) \right]^* \times \left[\sum_{k=N_{\text{FFT}}/2}^{N_{\text{FFT}}-1} r(\hat{\theta} + k) p_i^*(k) \right] \right) \quad (3.17)$$

3.2.3. Magyarázat

A vevőoldalon (UE) az eszközben található oszcillátor hibája nagyban befolyásolja a vétel minőségét, és mivel GHz feletti tartományban mozgunk, ezért a frekvenciahiba a jelet elrontja. Ezt a hibát reprezentálja a 3.14 képletben szereplő exponenciális tag. Gyakorlatilag a mintavételi frekvencia hibája egy folytonos fázishibaként fogható fel a jelben, és pont ez teszi lehetővé, hogy a hibát becsüljük.

Mivel a szinkronizációs jelek ismertek, ezért a vevőoldalon a vett jelet keresztkorrelálva az ismert PSS szekvenciákkal megtalálhatjuk a PSS szimbólum kezdetét. Mivel tudjuk, hogy melyik PSS szimbólum keresztkorrelációja adja a legnagyobb korrelációs együtthatót, így a Cella ID szektort is megállapíthatjuk.

Végezetül már csak arra van szükségünk, hogy a vett PSS szimbólum és az eredeti PSS szimbólum különbségéből a frekvenciahibát megállapítsuk, amelyet szintén a keresztkorreláció eredményének fázisa mutat meg (lásd 3.17 képlet). A 3.17 képlet alapja, hogy a PSS szimbólum első felének korrelációs együtthatójának fázisát és a második felének korrelációs együtthatójának fázisából megkaphatjuk, hogy a PSS szimbólum átvitele alatt mennyit változott a fáziskülönbség, amelyből a frekvenciahibát kiszámíthatjuk (Fontos, hogy az eredmény a normalizált frekvenciahibát adja meg, tehát független az alkalmazott 5G numerológiától).

3.3. SSS dekódolása

Miután megmértük a helyi frekvenciahibát, és abból visszaállítottuk az eredeti jelet, a másodlagos szinkronizációs jelet kell dekódolni. Az összes lehetséges SSS definiálva van a vevő számára, és a jel kezdete is ismert, ha a PSS helyét már ismerjük.

A dekódolás a PSS-hez hasonlóan keresztkorreláció számítással történik, azonban ennek magasabb erőforrás igénye van, hiszen nagyságrendekkel több lehetséges SSS jellel kell korreláltatni a vett jelet, hogy a valódit megtaláljuk.

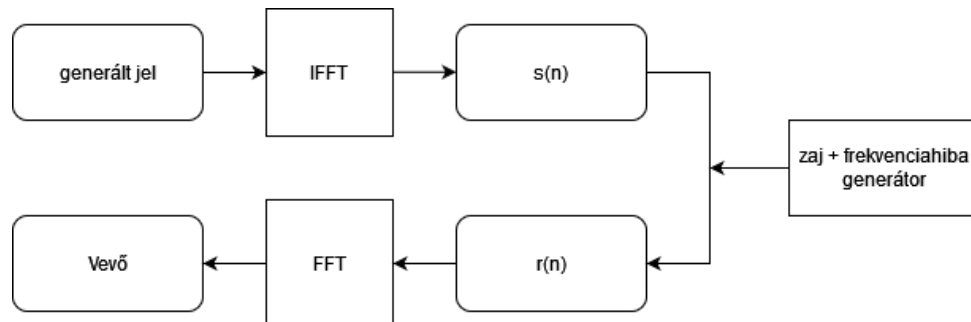
4. fejezet

Szimulációs eredmények

4.1. Szimulációs környezet

A szimulációkat Python környezetben végeztem el, ahol a számítások jelentős részét a numpy könyvtár segítségével implementáltam, az eredmények értékeléséhez pedig a matplotlib könyvtárat használtam fel. A szimuláció során egy Cella ID-ra vonatkoztatva végeztem el a méréseket, méghozzá a 120-as sorszámmra. 256 alvivővel végeztem a szimulációkat, így az $N_{FFT} = 256$.

A szimulált szinkronizációs jeleket a szabvány szerint generáltam, az egyetlen különbség az volt, hogy közöttük nem hagytam védőidőt, a PSS-t azonnal az SSS követi. A két jel előtt és után védőidőt hagytam, itt csak zaj van a jelben.



4.1. ábra. A szimulált rendszer blokkvázlata

A jelfeldolgozási és szinkronizációs feladatokat a vevő végzi el. A szimulációt -45 dB és 5 dB között változó jel-zaj viszonytal végeztem el, és mindegyik esetben 1000-szer szimuláltam egy szinkronizációs burstöt.

4.2. PSS megkeresése

4.3. SSS dekódolása

4.4. Hibabecslés

Irodalomjegyzék

- [1] <http://hvt.bme.hu>
- [2] Rádiótechnika évkönyve 2007, 172. oldaltól
- [3] Dudás Levente, *Digitális nyalábformálású antenna (DBF)* diplomaterv, BME SzHVT, 2007
- [4] <http://kicad-pcb.org/>

Függelék

A függelék az a fejezet, amely nem képezi szerves részét magának a dolgozatnak (nem növeli az oldalszámot), csak a megértést segíti, illetve a plusz ábrákat, pl. kapcsolási rajzokat, NYÁK terveket, program forráskódokat tartalmazza, de természetesen lehet hivatkozni rá (és sok esetben kell is).

Jelen dokumentumot, nemcsak pdf, hanem L^AT_EX forráskód szinten is közzéteszem, abból a megfontolásból, hogy lehetőség szerint legyen egységes a beadott beszámolók és jegyzőkönyvek formátuma és kinézete.

Jelen dokumentum forráskódja példákat tartalmaz a szövegek, képek, táblázatok, számozott és számozatlan felsorolások szerkesztésére, tagolására, formátumára vonatkozóan beleértve a matematika kifejezések forráskód szintű kezelését is.

A LaTeX letölthető többféle operációs rendszerre innen:

<https://www.latex-project.org/get/>

Ha valakinek magyar nyelvű szótárra van szüksége, akkor használhatja jelen dokumentum mappájában levő állományt is: a fordítóban kell beállítani a nyelvi beállításoknál.