

DIPLOMATERV

Mobiltelefonok RF sugárzásának mérése

Bakó Tamás Béla

2001

Konzulensek: Dr. Mátay Gábor, egyetemi adjunktus
Dr. Thuróczy György, okl. vill. mérnök, főosztályvezető, OSSKI

Nyilatkozat

Alulírott, Bakó Tamás Béla, a Budapesti Műszaki Egyetem hallgatója kijelentem, hogy ezt a diplomatervet meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, és a diplomatervben csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint, vagy azonos értelemben de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Bakó Tamás

Bakó Tamás Béla

Tartalomjegyzék

Kivonat	5
Abstract	6
1. Bevezetés	7
2. A rádiófrekvenciás sugárzás élő szervezetre gyakorolt hatásai	8
2.1. Hőhatások.....	9
2.2 Nem hőmérsékletemelkedésen alapuló hatások.....	11
2.2.1. Töltött részecskék mozgásán alapuló hatások.....	12
2.2.2. Anyagok nemlineáris tulajdonságain alapuló hatások.....	13
3. Mobiltelefonok által keltett hatások.....	15
3.1. Áttekintés a mobiltelefon készülékekről.....	15
3.2. Mobiltelefonok sugárzásával kapcsolatban tapasztalt hatások	18
3.2.1. Hőhatások	19
3.2.2. Tumorképződéssel kapcsolatos vizsgálatok	20
3.2.3. Agyi tevékenységre gyakorolt hatások	21
3.2.4. Rádiófrekvenciás hiperérzékenység	22
3.2.5. Elektromos berendezésekre gyakorolt hatás	22
4. A rádiófrekvenciás sugárzás mérése	24
4.1. Dozimetriai alapfogalmak.....	24
4.1.1. Az emittált sugárzás vizsgálata	24
4.1.2. Az abszorbeált sugárzás vizsgálata.....	25
4.2. RF mérőberendezések	27
4.2.1. Az antenna.....	28
4.2.2. Az elvezetés.....	29
4.2.3. A mérőerősítő.....	30
4.3. Fantomok.....	30
5. Mérőrendszer kifejlesztése mobiltelefonok RF sugárzásának méréséhez	34
5.1. A mérőrendszer felépítése.....	34
5.2. Tartószerkezet és árnyékolás.....	35
5.3. Mérőantenna, elvezetés és mérőerősítő	36
5.4. Az antennamozgató rendszer	38
5.5. Az A/D átalakító részletes ismertetése.....	40
5.5.1. Specifikáció, alapterv, alkatrészek kiválasztása	41
5.5.2 A hardver megtervezése	43
5.5.3. A mikrokontroller vezérlőszoftverének elkészítése.....	47
5.5.4. Az A/D átalakító beállítása	50
5.6. Az adatgyűjtő és motorvezérlő szoftver részletes ismertetése.....	51
5.6.1. A projekt fogalma	51

5.6.2. Alapbeállítások.....	52
5.6.3. Zajszint beállítás	52
5.6.4. Motorvezérlés.....	54
5.6.5. Mérés végrehajtás	55
5.6.6. Mérés kiértékelés.....	56
5.7. Ellenőrző mérések	58
5.7.1. A mérőfej RF teljesítmény / feszültség karakterisztikájának vizsgálata.....	58
5.7.2. A mérési háttérzaj tulajdonságai	60
5.7.3. A mérőfej pozicionálás pontatlansága	61
6. Sugármérések különböző mobiltelefon típusoknál.....	63
6.1. Mobiltelefonok összehasonlító mérése	63
6.2. Mobiltelefon "head-set"-jén végzett mérések.....	66
6.3. Sugárzás elleni védelem céljából árusított eszközök vizsgálata	67
7. Összefoglalás	72
Köszönetnyilvánítás	74
Irodalomjegyzék.....	75
Függelék A: Az ADCONV-001 készülék részletes áramköri rajza.....	77
Függelék B: Az ADCONV-001 készülék tápfeszültség-csatlakozójának bekötési rajza	78
Függelék C: Kommunikáció az ADCONV-001 készülékkel.....	79
Függelék D: A mikrokontroller vezérlőszoftvere (ADPIC.ASM)	81
Függelék E: Mérési jegyzőkönyvek.....	86
E.1. Az ADCONV-001 mérőeszköz kalibrálása.....	86
E.2. Az ADCONV-001 mérőeszköz feszültségstabilitásának vizsgálata.....	88
E.3. A mérőfej RF teljesítmény / feszültség karakterisztikájának vizsgálata.....	90
Függelék F: A lemezmelléklet tartalma	101

Kivonat

Dolgozatomban mobiltelefonok rádiófrekvenciás sugárzásának mérésével foglalkozom. Célom egy meglevő RF sugárzásmérő rendszer továbbfejlesztése a mérések gyorsaságának és pontosságának növelésére és a továbbfejlesztett rendszer segítségével mérések végzése.

Dolgozatomban először összefoglalom az RF sugárzások hatását az élő szervezetekre és ismertetem az RF sugárzások mérésének alapelveit. Külön foglalkozom a mobiltelefonok által keltett sugárzások paramétereivel és az ilyen típusú sugárzások biológiai hatásaira irányuló kutatásokkal.

A dolgozat második részében részletesen bemutatom az általam megismert mobiltelefon mérőrendszert és a mérőrendszerrel kapcsolatban megismert problémákat. Leírom, hogy hogyan fejlesztettem ki a rendszer tökéletesítéséhez egy új digitalizáló hardvert és egy új vezérlő- és adatgyűjtő szoftvert.

A dolgozat utolsó részében ismertetem a mérőrendszerrel mobiltelefonokon, mobiltelefon "head-set"-en és sugárzásvédelmi célból árusított eszközökön végzett vizsgálataim eredményét.

Abstract

The subject of my diploma-thesis is electromagnetic radiation measurement on mobile phones. The aim of the thesis was to improve the precision and the efficiency of a formerly developed EM measurement system and to make measurements with the new one.

First the effects of EM radiation on biological tissues and livings, then the basic principles of EM measurements will be discussed. A separate section deals with the parameters of mobile phone radiation and with the effects of this radiation pattern.

The second half of the thesis describes the structure of the original EM measurement system I dealt with, and describes the problems of it. A new data acquisition hardware and a new system-control software will be shown, which are developed by the author.

The last part of the thesis introduces the results of measurements on mobile phones, mobile phone head-sets and mobile phone radiation protection devices.

1. Bevezetés

Az élő szervezetek mindig is kölcsönhatásban voltak rádiófrekvenciás elektromágneses jelenségekkel, a minket körülvevő rádiófrekvenciás sugárzás egy része ugyanis természetes forrásokból származik. Ilyen természetes források például a kozmikus háttérsugárzás, a Napból származó rádiófrekvenciás jelek, vagy a villámok által létrehozott rádiófrekvenciás impulzusok. A természetes hatások által létrejött RF háttérintenzitás értéke kb. $1,4 \cdot 10^{-5} \text{ W/cm}^2$ [1].

Az utóbbi évszázadban számos, az ember által létrehozott mesterséges rádiófrekvenciás sugárforrás jelent meg. Ilyen sugárforrások például a rádió és TV műsorszóró állomások, az iparban és gyógyászatban használt mikrohullámú berendezések, radarberendezések és persze a mobiltelefonok. Az utóbbi 40 évben a sugárzási szint egy átlagos városi lakos számára a természetes szint kb. 350-szeresére nőtt [2]. Az embereket éppen ezért már régóta foglalkoztatja a kérdés: milyen biológiai hatásai vannak az RF sugárzásoknak? A kérdés az utóbbi évtizedben – a mobiltelefonok elterjedése miatt – előtérbe került. A témával kapcsolatban több mint 12000 tanulmány készült [2]. Egyelőre még nem sikerült minden kérdésre választ adni: számos egészségügyi kutatási program foglalkozik jelenleg is a rádiófrekvenciás sugárzások hatásaival. A második fejezetben ezekről a hatásokról lesz szó. Ebben a fejezetben azokra a legfontosabb hatásokra térek ki, amelyek létezését több tanulmányban is leírták és megerősítették, illetve azokra, amelyeket bizonyítottan megcáfoltak. A harmadik fejezetben külön tárgyalom a mobiltelefonok által keltett sugárzás eddig megismert hatásai, illetve előtte a mobiltelefonok felépítése és az általa kibocsátott sugárzás jellemzői.

Munkám során a rádiófrekvenciás hatások kutatásának egy kis szeletével: mobiltelefonok elektromágneses sugárzásának mérésével, és egy erre alkalmas mérőrendszer elkészítésével foglalkoztam. Ehhez fejlesztettem tovább egy már meglevő mérőrendszert. Ennek kapcsán meg kellett ismerkednem az RF sugárzás mérési alapelveivel és fogalmaival. Erről lesz szó a negyedik fejezetben. Az ötödik fejezetben lesz szó magáról az elkészített mérőrendszer felépítéséről és az általam végzett továbbfejlesztésekről. A hatodik fejezetben az új rendszerrel néhány mobiltelefonon végzett mérések eredményeit ismertetem. Az utolsó fejezetben összefoglalom az elért eredményeket.

2. A rádiófrekvenciás sugárzás élő szervezetre gyakorolt hatásai

Az RF sugárzások biológiai hatásait két fő csoportra lehet bontani aszerint, hogy a sugárzási szint, pontosabban a sugárzás által okozott hőhatás mekkora az élő szervezet hőszabályozó képességéhez viszonyítva [1],[4]. A két csoport a következő:

- hőhatások: a sugárzási szint olyan nagy, hogy a szervezet hőszabályozása már nem elegendő és 1°C-nál nagyobb hőmérsékletemelkedés észlelhető. A hatás a hőmérsékletemelkedéshez kapcsolódik.
- nem hőmérsékletemelkedésen alapuló hatások: ide azok a hatások tartoznak, amelyek akkor is fellépnek, amikor a sugárzási szint nem okoz jelentős hőmérsékletemelkedést, vagy ha esetleg hőmérsékletemelkedés lép fel, de a hatás nem ehhez kapcsolható.

A nem hőmérsékletemelkedésen alapuló hatásokat két további csoportra szokták bontani: nem-termikus és atermikus hatásokra [1]. Nem-termikus hatásoknak nevezzük azokat a hatásokat, amelyeknél a sugárzási szint olyan kicsi, hogy a szervezet hőszabályozó rendszerére nincs különösebb hatással. Atermikus hatások esetén még szintén nem mérhető az élő szervezetben jelentősebb hőmérsékletemelkedés, de ez már a hőszabályozó rendszer működése miatt van, ilyenkor például a vérkeringés már fokozódik.

A hatások szétválasztása számos esetben nehéz, ugyanis azonos sugárzási szint esetén átfedés lehetséges a hatások között a szervek hőszabályozó képessége szerint. Például az agyszövet igen nagy hőszabályozó képességgel bír, a szemlencse viszont nem, mert nincs vérellátása [1]. Egyes jelenségek ki is lógnak ebből a szétválasztásból. Ilyen például a "mikrohullámú hallás": ez a hatás nem biztos, hogy a hőhatáson alapul, de csak olyan nagy térerősségeknél lép fel, amikor már hőhatás is megjelenik.

További tényezők, amelyek megnehezítik a hatások szétválasztását, viszont fontos szerepet játszanak a jelenségek kialakításában és felerősítésében: a vizsgált testben kialakuló forrópontok és rezonanciák. A besugárzott alany teste, vagy egyes szervei antennaként vagy üregrezonátorként képesek viselkedni, így bizonyos frekvenciákon a test mentén elhelyezkedő bizonyos helyeken "összegyűjtik és felerősítik" a környezetükben levő sugárzást. Ha a rezonancia nagyon éles, a jelenség olyan erős lehet, hogy a mikrohullámú sugárzás már akkor képes megfigyelhető hatásokat létrehozni, amikor rezonancia nélkül az okozott hatás elveszne a termikus zaj okozta

hatások mellett [4]. A földön álló emberi test egy rövidített $\lambda/4$ -es monopól antennaként képes rezonálni. Ennek a dipólnak a rövidülési tényezője 0,72 és 0,8 között van. Ez alapján egy átlagos, 175 cm magas ember testének rezonanciafrekvenciája kb. 65 MHz-nél van. A belső szervek negyedhullámú üregrezonátorként képesek viselkedni. Ekkor például a 15-20 cm átmérőjű emberi koponya rezonanciafrekvenciája 375 – 500 MHz között, a 2,4 cm átmérőjű szemüreg rezonanciája pedig 3,1 GHz-nél van. A testrészek által képviselt rezonáns elemek mentén létrejövő állóhullámok következtében a lokális elektromos tér maximumainál jelentkező abszorpció következtében a lokális hőmérsékleti maximumok ún. *forrópontok* jönnek létre.

Nagyobb lokális hőmérsékletű helyek alakulnak egy másik jelenség következtében is, amikor az erőtér hatására kialakuló ún. indukált áramok a test szűk keresztmetszetű vezető területeinél, pl. a csuklónál, bokánál, nyaknál, összesűrűsödnek, és így itt jóval nagyobb hatásokat váltanak ki, mint egyéb területeken. Az erőtér sűrűsödését okozhatják még a test felületén levő fémtárgyak is. Ezek a sűrűsödési pontok szintén forrópontok. Ezeken a területeken a térerősség az egyéb területekhez képest akár 1 nagyságrenddel is nagyobb lehet.

A következőkben nézzük meg részletesebben a létrejövő hatásokat:

2.1. Hőhatások

Az RF sugárzások egyik legfontosabb hatása a hőhatás. Azt a tényt, hogy a rádiófrekvenciás sugárzás melegíteni képes a szöveteket, a kutatók már régóta észrevették, sőt alkalmazták is. 1929-ben például már mesterséges lázat állítottak elő RF oszcillátorok segítségével, hogy az általa létrehozott melegítő hatással szifiliszt kezeljenek [3]. Diatermiás kezelés néven ma is alkalmaznak a gyógyászatban nagyfrekvenciás elektromágneses sugárzást, ami segítségével reumatikus betegségeket lehet gyógyítani, és csonttörések gyógyulását lehet elősegíteni. A rádiófrekvenciás sugárzás rákos megbetegedések diagnosztizálására és terápiájára is alkalmazható [34].

A biológiai hatás legtöbbször azon alapul, hogy a besugárzott területen megnő a hőmérséklet, emiatt felgyorsulnak az anyagcsere-folyamatok és megnő a véráramlás. Magasabb hőmérsékleten az immunrendszer is fokozott működésbe kezd, így a gyógyulási folyamatok felgyorsulnak.

Szifilisz gyógyítása esetén arról van szó, hogy a szifilisz okozó baktériumok csak egy nagyon szűk hőmérsékleti sávban életképesek és 1-2 fokos hőmérsékletemelkedés már végzetes hatású rájuk nézve.

Érdekes felfedezéseket tettek az agyi kapillárisok falában működő vér-agy gát működésére vonatkozóan is. Állatkísérletek alapján megállapították, hogy akut hőhatással járó mikrohullámú sugárzás megváltoztatja a vér-agy gát működését [1]: a vér-agy gát szelektív permeabilitása megváltozik, ezáltal ilyenkor olyan vegyületek is bejuthatnak az agyba, amelyek a normálisan működő vér-agy gáton nem jutnának át. Ennek hatására megváltozhat az agyat körülvevő cerebrospinális folyadék ionösszetétele, ennek pedig kismértékű megváltozása is jelentős következményekkel jár (például viselkedésbeli megváltozásokkal). Ezt a jelenséget a gyógyításban is fel lehet használni, mert így olyan gyógyszerek juttathatók el az agyszövetig, amelyek közönséges körülmények között nem hatnának.

Az RF sugárzás által okozott hőmérsékletemelkedés azonban nem csak gyógyító jellegű tud lenni. A nagy hőmérsékletemelkedés hatására szövetelhalás léphet fel. Ilyen módon mikrohullámú égési sérülések, szürkehályog vagy impotencia jöhet létre. Ezeket a sérüléseket radarállomáson dolgozó katonáknál figyelték meg [34].

A mikrohullámú sérülések nagyon fájdalmasak és nehezen gyógyulnak. A sérülések a mélyebben fekvő nagy víztartalmú, jól vezető szövetekben alakulnak ki, mint például a szemlencse, az izom-, agy- vagy hereszövet. A bőrfelszínen gyakran semmilyen elváltozás nem figyelhető meg. Ez azért is veszélyes, mert a bőr alatti szövetek teljesen elhalhatnak, amikor az áldozat még mindig nincs tudatában a bajnak (a hő- és fájdalomérzékelő receptorok ugyanis főleg a bőrben helyezkednek el) [9]. A szemlencsénél további probléma, hogy nem tartalmaz vérereket, nincs keringése, így itt nagy hőmérsékletemelkedés jöhet létre már kisebb sugárzási szinteknél is.

Az RF sugárzással keltett 1°C-os hőmérsékletemelkedésnél is tapasztalható már élettani hatás. A szövetek ilyen kismértékű felmelegítése esetén már megváltozik a sejteket határoló membránok áteresztő képessége, ami hatására eltolódik a sejt ionegyensúlya. Kísérletek mutatják, hogy RF sugárzással keltett kismértékű hőmérsékletemelkedés magatartásbeli eltéréseket, valamint tanuló- és emlékezőképesség csökkenést okozott a kísérleti állatoknál [4].

A hőhatásokra jellemző, hogy a létrejöttükhöz egy adott sugárzási szint szükséges, ez alatt bármilyen hosszú besugárzás esetén sem alakulnak ki, mert az élő szervezet

hőszabályozó rendszere nem engedi létrejönni a szükséges hőmérsékletemelkedést. Ez a minimális szint nagyon sok paramétertől függ, mint például az élőlények fajtájától, a besugárzott szövet típusától, a besugárzás helyétől és hosszától. Viszont meg lehet állapítani egy olyan sugárzási szintet, ami alatt már biztosan nem jön létre termikus hatás. Ez a határ az embernél kb. 10 mW/cm^2 -nél van. Sok országban, pl. Amerikában és Nyugat-Európában is ez az érték az alapja a szabványban meghatározott maximális sugárzási szinteknek [9].

2.2 Nem hőmérsékletemelkedésen alapuló hatások

A kutatók az RF sugárzás nem termikus hatásaira is korán elkezdtek gyanakodni. Az első, nem hőhatáson alapuló jelenséget 1931-ben mutatta ki E. Pflomm, német kutató, aki RF besugárzás hatására kísérleti állatokon bradikardiát mutatott ki [32] (igaz, a későbbiekben kiderült, hogy ez a kísérlet téves eredményeket adott). A nem-termikus és atermikus hatások vizsgálata és feltérképezése a mai napig folyik. Rendkívül nehéz megállapítani a sugárzások hatását, ez ugyanis függ az RF sugárzás frekvenciájától, erősségétől, az RF jelen alkalmazott modulációtól, a besugárzás hosszától, a besugárzott egyed fajtájától, egészségi állapotától, pillanatnyi állapotától, életkorától és a besugárzás helyétől. A hatások gyakran nem túl erősek és nehezítik a megfigyelést egyéb fellépő hatások [5].

A rádiófrekvenciás sugárzás nem termikus jelenségeinek két fő fizikai hatást tételeznek fel [4]. Megkülönböztethetők:

- töltött részecskék mozgásán alapuló hatások,
- anyagok nemlineáris tulajdonságain alapuló hatások.

Itt, a hatások alapjainak felsorolásánál fontos megemlíteni, hogy a rádiófrekvenciájú fotonok energiája rendkívül kicsi, ezért a rádiófrekvenciás sugárzás nem képes közvetlenül kémiai kötések szétbontani, és ilyen módon kémiai, illetve biológiai hatásokat létrehozni, ezért a rádiófrekvenciás sugárzás **nemionizáló sugárzás**. A leggyengébb kémiai kötések bontásához is legalább 1 eV energiával rendelkező fotonokra, anyagok ionizáláshoz pedig 10 eV -nál is nagyobb energiára van szükség. Azonban például 900 MHz -en egy foton mindössze $3,7 \text{ } \mu\text{eV}$ energiával rendelkezik. A kémiai kötések bontása tehát csakis a hőhatáson keresztül történhet [4]. Most pedig nézzük meg közelebbről az egyes jelenségeket.

2.2.1. Töltött részecskék mozgásán alapuló hatások

Oldatban levő töltött részecskék elektromos erőter hatására rendezett mozgásba kezdenek. Váltakozó erőter hatására a részecskék rezgéseket kezdenek végezni. Ez a mozgás befolyásolhatja kémiai reakciók sebességét.

Kolloid oldatokban a rendezett mozgás hatására a molekulák speciális alakzatokba rendeződhetnek, így például oszcilláló erőterrel kolloid oldatban gyöngyfüzér-szerű képződmények hozhatók létre [33]. Ennek hatására jelentősen megváltozhatnak az oldat fizikai és kémiai paraméterei egyaránt, például az oldat viszkozitása vagy átlátszósága.

Ilyen jelenségeket a kutatók in vitro körülmények között tudtak létrehozni. A jelenség létrejötte függ attól, hogy milyen frekvenciájú, milyen erősségű, mennyire homogén az erőter és milyen modulációt alkalmaztak. Elsősorban kis frekvenciájú erőterekkel érhetők el változások, nagyfrekvenciás erőterek esetén az elmozdulások ugyanis a részecskék kis töltése, nagy tehetetlensége és a részecskéket körülvevő közeg rezgéscsillapító hatása miatt már nagyon kicsik. A hatás azonban két esetben is felerősödhet az élő szervezetben: A szervezetben levő sejtek gyakran nagy elektromos töltéssel rendelkeznek. A nagy töltéssel rendelkező sejtekben, különösen akkor, ha a besugárzás frekvenciája megegyezik a sejt rezonanciafrekvenciájával, a keletkező mozgások erőteljes élettani hatásokat produkálhatnak [4].

Másképp erősödhet fel a mozgáson alapuló hatás, ha az anyag nemlineáris tulajdonságokat is mutat: ekkor a mozgáson alapuló hatások ugyanis modulált nagyfrekvenciás térrel is előidézhetők. A hatás ekkor a moduláló frekvenciával lesz kapcsolatban.

Kutatók kis frekvenciával modulált RF sugárzás hatására kis mértékű ornitindekarboxiláz enzimszint növekedést figyeltek meg sok esetben [4]. Ennek az enzimnek a szintje rákos folyamatok esetén is megnövekszik. Ez nem jelenti azt, hogy a megnövekedett enzimszint növeli a rákos folyamatok esélyét (epidemiológiai vizsgálatok eddig semmilyen kapcsolatot nem tudtak kimutatni alacsony szintű RF sugárzások és rákos megbetegedések között), mindenesetre fokozott figyelem kíséri ezeket a kísérleteket.

2.2.2. *Anyagok nemlineáris tulajdonságain alapuló hatások*

Ha egy nemlineáris tulajdonságokat mutató anyagot adott frekvenciájú modulálatlan nagyfrekvenciás erőterbe helyezünk, akkor a nagyfrekvenciás erőter elektromos amplitúdója időfüggvényének eredeti szinuszos formája el fog torzulni. Ha a kapott torz jelformát Fourier-sorba fejtjük, láthatjuk, hogy az anyagban egyrészt felharmonikus nagyfrekvenciás erőter komponensek jelennek meg, másrészt – a nemlinearitás függvénynek megfelelő mértékben – egyenáramú komponens is képződik. Amplitudómodulált nagyfrekvenciás erőter esetében a nemlinearitás következtében az anyagban a moduláló jel és annak harmonikusainak megfelelő erőter komponensek is kialakulhatnak.

Az élő szervezetet felépítő anyagok nagy része – például a sejtmembrán – nemlineáris elektromos tulajdonságokat mutat (a sejtmembránnak például éppen ezen alapul a működése). A nagyfrekvenciás erőter hatására – az előbb leírtak alapján – megváltozhat a sejtmembránok potenciálja. Ennek hatására feszültségfüggő ioncsatornák nyílhatnak meg, vagy zárulhatnak be a sejt felszínén, ezzel megváltozhat a szervezet ionegyensúlya. Idegsejt esetén serkentő vagy gátló hatás jöhet létre, esetleg spontán akciós potenciálok is kiváltódhatnak. Több kutatócsoport vizsgálta a folytonos (modulálatlan szinuszos vivőhullám által keltett) nagyfrekvenciás erőterek hatását. RF erőter hatására kicsi, de statisztikailag szignifikáns teljesítménycsökkenést találtak patkányok EEG-jének bizonyos frekvenciasávjaiban [4].

Ha a nagyfrekvenciás erőteret moduláljuk, akkor a nemlineáris torzulás után a moduláló frekvenciának megfelelő frekvenciájú jelkomponens is létrejön, ami további összetett hatásokat képes kiváltani. 1975 óta vizsgálják ezeket a hatásokat. Kimutatták, hogy a legerősebb hatásokat a 16 Hz frekvenciával modulált nagyfrekvenciás erőterek hozzák létre [4],[6]. A 16 Hz-es moduláció hatására a kalciumion mennyiség jelentősen csökkent az idegsejtek belsejében. Mások az idegsejtek spontán tüzelésének és az idegvégződéseken felszabaduló neurotranszmitterek mennyiségének csökkenését tapasztalták modulált RF sugárzás hatására [4],[7].

Nagyon érdekes jelenség, az ún. "mikrohullámú hallás" figyelhető meg emlősök radarimpulzusokhoz hasonlóan modulált RF sugárzással történő besugárzása hatására [4]. A besugárzott egyedek ilyenkor sziszegő, zúgó hangot hallanak (ezeket a kísérleteket embereken is végezték, innen tudják a hang leírását. Állatok esetén a hangok hallása a mozgásreakciókból deríthető ki). Ehhez a hatáshoz nagyon nagy

csúcsértékű és kis kitöltési tényezőjű RF impulzusokra van szükség. Az átlagos térerősség ebben az esetben akkora (minimum 20 mJ/kg [35]), hogy gyakran enyhe hőmérsékletemelkedés is fellép, azonban a hatás feltehetően a nemlineáris tulajdonságokhoz kapcsolódik. A jelenség pontos mechanizmusa még nem teljesen tisztázott.

3. Mobiltelefonok által keltett hatások

Az előző fejezetben áttekintést kaphattunk arról, hogy a rádiófrekvenciás sugárzásnak milyen általános élettani hatásai vannak. Láthattuk, hogy a hatások erőteljesen függenek a rádiófrekvenciás tér teljesítményétől, frekvenciájától és modulációjától. A hatások bizonyos vivőhullám frekvencia tartományokban, bizonyos moduláló frekvenciatartományokban és meghatározott szinttartományokban történő felerősödését a kutatók "ablakjelenségeknek" nevezik. A mobiltelefonok jól leírható tulajdonságú elektromágneses teret bocsátanak ki. Ahhoz, hogy meg tudjuk határozni a mobiltelefonok által kibocsátott térnek a hatását, előbb ismerjük meg a mobilkészülékek és kibocsátott sugárzásuk paramétereit.

3.1. Áttekintés a mobiltelefon készülékekről

Mobiltelefonokat már az 1950-es évek óta használnak. Legelőször az amerikai hadseregben alkalmazták őket. Azóta a mobiltelefonok több generációját fejlesztették ki. Az egyes generációkat országonként eltérő fantázianevekkel illették, Németországban például az ABC betűivel jelölték. Mivel a német jelölésrendszer nagyon egyszerű és következetes, ezért a továbbiakban ezt a jelölésrendszert használok én is.

Egészen 1992-ig az egész világon csak analóg rendszerű mobiltelefonokat használtak [10]. Ezek a berendezések a beszélgetés folyamán folyamatosan sugároztak. 1957 és 1977 között használták az "A" típusú telefonokat. Ezeken még közvetlen hívás nem volt lehetséges, csak központon keresztüli kapcsolat. 1972-ben vezették be a "B" típusú telefonokat, és egészen 1994-ig alkalmazták őket. Itt már nem volt szükség a központ felhívására egy beszélgetés lebonyolításához. Az "A" és "B" típusú telefonok nem igazán kézi berendezések voltak, inkább csak a hordozható jelzés illett rájuk. A készülékek 150 MHz-en működtek. A hordozható berendezések néhány W energiával sugároztak, az autókba szerelt készülékek akár 20 W energiával is sugározhattak. Ezekre a rendszerekre csak kevés számú előfizetőt lehetett kapcsolni.

Az 1980-as évek közepén vezették be a "C" típusú telefonokat. Ezek még mindig analóg rendszerűek voltak, viszont a kialakított új hálózatokra jóval több előfizetőt lehetett kapcsolni. Többféle telefonszabvány terjedt ekkor el. Amerikában, Angliában és Olaszországban a Total Access Cellular System (TACS), a skandináv államokban és a

Benelux államokban a Nordic Mobile Telephone standard (NMT), Franciaországban a Radiocom 2000TM, Németországban pedig a C-Net [11]. A telefonok a 450 MHz körüli frekvenciatartományban működtek. Ezek már tényleg "kézikészülékek" voltak. A kibocsátott teljesítményt szabályozni lehetett, a kézi telefonok maximum 1 W körüli teljesítményt bocsátottak ki, az autókba szerelt telefonok kb. 5 W-osak voltak.

A 80-as években merült fel a gondolat, hogy egy újfajta digitális mobiltelefon rendszert kellene létrehozni. 1982-ben alakult meg a Groupe Spécial Mobile (GSM) társaság, hogy egy új digitális mobiltelefon szabványt hozzanak létre [11]. (A GSM kezdőbetűk később a Global System for Mobile communication kifejezés rövidítésévé váltak). A digitális rendszer főbb előnyei: több előfizetőt lehet rákapcsolni, megoldható az országok közötti kompatibilitás, hatékonyabban lehet a frekvenciasávokat kihasználni, alkalmazkodni lehet a pillanatnyi forgalomhoz, jobb minőség érhető el, különleges szolgáltatásokat lehet nyújtani és olcsóbb a kiépítés. A GSM 900 digitális rendszer szolgáltatásai 1992-ben indultak be. Egy évvel később indult be a DCS 1800-as rendszer (Digital Cordless System), ami szintén GSM rendszer csak más frekvenciasávban működik. A GSM 900-as rendszerhez tartoznak a "D" típusú, a DCS 1800-as rendszerhez pedig az "E" típusú telefonok.

A GSM 900 rendszer 900 MHz körül működik. 124 darab 200 kHz szélességű frekvenciasáv áll rendelkezésre a 890-915 MHz tartományban, amelyben a mobilkészülékek sugároznak a bázisállomások felé és ugyanilyen sávszélességű és ugyanennyi sáv áll rendelkezésre a 935-960 MHz tartományban, amelyben a bázisállomások sugároznak a mobiltelefonok felé. Ez tehát azt jelenti, hogy csak frekvenciaosztás segítségével egy bázisállomáson maximum 124 előfizető beszélhet egyszerre (Magyarországon csak 40, ugyanis az egyes GSM szolgáltatók csak 40-40 frekvenciát kaptak [2]). Azonban a frekvenciaosztásos rendszer mellett időosztásos rendszert is alkalmaznak, ami segítségével 8 telefon működhet egyszerre egy frekvencián. A 8 telefon mindegyike egy-egy 577 μ s hosszú időablakban dolgozhat. Az időablakok sorrendje egy beszélgetés közben nem változik. A 8 időablak egy keretet képez. Egy csatornában másodpercenként 217 keret továbbítódik a bázisállomás felé (vagy a bázisállomás felől). Azt, hogy egy telefon melyik időszeletet kapja meg egy beszélgetés lebonyolításához, a bázisállomás dönti el, véletlenszerűen.

A bázisállomások vezetékes vagy optikai hálózaton, vagy pedig irányított rádióhullám-nyalábokkal kommunikálnak egymás között. A bázisállomások a 6, 13, 15, 18, 23, 38 vagy 58 GHz-es frekvenciákat használják.

A DCS 1800 rendszer csaknem teljesen azonos felépítésű a GSM 900-zal, a különbség csak annyi, hogy a rendszer 1800 MHz körül működik és 374-374 csatorna áll rendelkezésre a mobiltelefon-bázisállomás és bázisállomás-mobiltelefon adatforgalomhoz [2]. A frekvenciasávok szintén 200 kHz szélességűek. 1710 és 1785 MHz között sugároznak a telefonok a bázisállomás felé és 1805 és 1880 MHz között sugároznak a bázisállomások a telefonok felé.

Amerikában nem a GSM szabvány terjedt el. Ott a mobiltelefonok 850 MHz, illetve 1900 MHz körül működnek, szintén időosztásos rendszerrel [16].

A GSM mobiltelefon készülék az átviendő hangot digitalizálja, tömöríti, segédinformációkat kever hozzá és adatcsomagokat képez belőle. A készülék másodpercenként 217 csomagot állít elő. Egy beszédrészletet tartalmazó csomag hossza 546 μ s (kicsit rövidebb, mint a rendelkezésre álló időablak) [14]. Léteznek más adatcsomagok is, például frekvenciakorrekciós vagy helymeghatározó jeleket tartalmazó csomagok. Ezek általában rövidebbek mint a beszélgetés csomagok és csak a készülék nyugalmi állapotában vagy a hívás kezdetén használatosak.

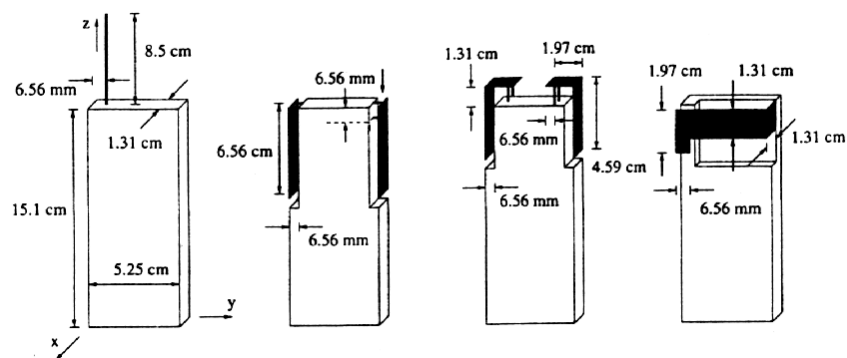
Ezeket a csomagokat küldi el a készülék a bázisállomásnak, az pedig ilyen csomagokat küld vissza, ami a másik készülék által küldött hangot tartalmazza. A beszélgetés során minden újabb időszakban a bázisállomás és a mobiltelefon egy újabb frekvenciára vált át egy a bázisállomás által meghatározott álvéletlen sorozat szerint. Ez azért hasznos, mert ha az egyik csatornán interferencia miatt a vétel nem lehetséges, akkor ez csak egyetlen csomag elvesztését okozza, ami a telefonbeszélgetés során csak egy halk reccsenést okoz és a beszéd végig érthető marad.

Az adatokat a készülék GMSK modulációval (Gaussian Minimum Shift Keying) ülteti rá a vivőhullámra. Ezzel a modulációval hatékonyan ki lehet használni a frekvenciaspektrumot. Fontos jellemzője ennek a modulációnak, hogy a moduláció hatására a készülékből kimenő RF teljesítmény nem változik [13].

A kézi GSM mobiltelefonok 900 MHz-en maximum 2 W csúcsteljesítménnyel, 1800 MHz-en maximum 1 W csúcsteljesítménnyel sugároznak. A maximális átlag teljesítmény az időosztásos rendszer miatt ennek csak kb. 1/8 része: 250 mW, illetve 125 mW. A készülékek teljesítményszabályozással is rendelkeznek, ami segítségével a

bázisállomás és a készülék be tudja állítani az adott körülmények között az átvitelhez éppen elegendő minimális teljesítményszintet. Ezáltal a készülék kevesebbet fogyaszt és a zavaró interferenciák kialakulására is kisebb az esély. A kimenő teljesítmény 2 dB-es lépésekben szabályozható, a legnagyobb elérhető csillapítás 36 dB [11].

Az RF teljesítmény kisugárzásához többfajta antennát használnak a mobiltelefonoknál (3.1. ábra). A leggyakoribb antennatípus a negyedhullámú monopólus. A negyedhullám hosszúságú, esetleg rövidített kivitelű antenna a készülék tetején helyezkedik el, a teljesítmény betáplálás az antenna alján történik, a földpontot pedig a készülék és az ember szolgáltatja. Szintén monopólus rendszerű az ún. back-mounted PIFA (Planar Inverted "F" Antenna). Itt az antenna a készülék hátoldalán egy fémlemezről van kiképezve, az ellenpontot a készülék többi alkatrésze adja (ilyenkor a mobiltelefont használó ember feje kevésbé módosítja az antenna paramétereit). Az energia betáplálása az "F" antennáknál nem az antenna alján történik, hanem az antenna szárán kicsit fentebb. Az antenna alja le van földelve (ekkor az elrendezés kicsit emlékeztet egy fejjel lefele fordított F betűre). Ebben az esetben jól lehet illeszteni a végfok és az antenna impedanciáját. Egy másik antennatípus dipólus rendszert használ: a dipólantennát képező két fémlemezt a készülék két oldalára helyezik (side-mounted PIFA), esetleg a két fémlemez magasabban helyezkedik el és a végeik a készülék tetejére vannak felhajlítva. Ez a BIFA (Bent Inverted "F" Antenna). Ez utóbbi esetben az antenna paramétereit kevésbé módosítja a mobiltelefont használó ember keze [12].



3.1. ábra: Mobiltelefon antennatípusok.

Balról jobbra: negyedhullámú monopólus, side-mounted PIFA, BIFA, back-mounted PIFA.

3.2. Mobiltelefonok sugárzásával kapcsolatban tapasztalt hatások

Az előző fejezetben leírtak alapján a rádiótelefonok sugárzására a következő adatok jellemzőek: a jelenleg még forgalomban levő analóg telefonok 450 MHz körül

egy szűk frekvenciasávban, maximálisan 1 W energiával, folyamatosan sugároznak. A digitális telefonok 900 vagy 1800 MHz körül, a folytonos frekvenciaváltogatás miatt egy nagyon széles frekvenciasávban működnek, a sugárzásuk pedig impulzusszerű. A kisugárzott jel csúcsteljesítménye 900 MHz-en maximum 2 W, 1800 MHz-en maximum 1 W, kitöltési tényezője 1/8, frekvenciája pedig 217 Hz. A GMSK moduláció miatt, amikor a telefon sugároz, és a bázisállomás és a telefon beállította az optimális teljesítményszintet, a kimeneti teljesítmény nem változik.

A mobiltelefonok által keltett sugárzás vizsgálata azért fontos, mert a készülék antennája a fejhez és ezért az agyhoz rendkívül közel helyezkedik el és a telefon által kisugárzott teljesítmény nagy része (akár a 70%-a is [12][15]) a fejben nyelődik el.

Számos laboratóriumi kísérletet hajtottak végre az ilyen paraméterekkel rendelkező RF sugárzások vizsgálatával kapcsolatban: szövettani kísérleteket, állatkísérleteket és önként jelentkező embereken végzett kísérleteket egyaránt. Sok epidemiológiai felmérést is végeztek. A kísérletek és a felmérések során elsősorban azt vizsgálták, hogy mekkora hőhatást okoz a mobiltelefon sugárzása, a fejben elnyelődő mobiltelefon sugárzás okozhat-e tumoros megbetegedéseket illetve elősegítheti-e a tumorok kialakulását, okoz-e eltéréseket a sugárzás az agyi tevékenységben és hogy létezik-e az RF sugárzásra való érzékenység. A kutatásoknak külön csoportját képezte a mobiltelefonoknak az egyéb elektromos berendezésekre gyakorolt hatása (EMC, **e**lectromagnetic compatibility), mint például a pacemakerekre vagy a kórházi készülékekre gyakorolt hatás, illetve epidemiológiai felmérések, amelyek a mobiltelefon-használat és az egyes halálokok (például agydaganatok, leukémia, de olyan halálokok is, mint például autóbalesetek) mortalitása közötti összefüggéseket keresték. Ez utóbbi azonban már nem feltétlenül tartozik a rádiófrekvenciás sugárzás közvetlen hatásai közé.

3.2.1. Hőhatások

Sok telefonfelhasználó számol be arról, hogy a kezében tartott mobiltelefon erős hőérzetet okoz. ezért is vizsgálták meg a telefonok sugárzása által keltett hőhatást.

A mérések különösen az analóg rendszerű telefonok esetében fontosak, mert itt jóval nagyobb térerősségek lépnek fel, továbbá a 450 MHz-es sugárzás közel van a fej rezonanciapontjához. Emiatt a sugárzás hatásai erősebbek és a hőmérsékletemelkedéssel

esetleg befolyásolni képesek az agyalapi mirigy működését, ami a koponyának a közepén helyezkedik el és a hőmérsékletszabályozásért felelős.

A mérések és a szimulációk azonban azt mutatják, hogy az elnyelődött sugárzás csak nagyon kis mértékű felmelegedést tud okozni (néhány tizedfokot) és azt is csak a fülkagylónál, illetve a fülcimpánál, ahol a legnagyobb a térerősség és az elnyelődés [4]. A fejben a sugárzás már olyan mértékben csillapodik és az agy termoregulációja olyan nagy, hogy a hőmérsékletemelkedés nem mutatható ki. A felhasználók által említett melegedést feltehetően a telefon akkumulátora és az RF végfokozat melegedése okozza.

3.2.2. Tumorképződéssel kapcsolatos vizsgálatok

Talán a tumorképződéssel és a rákos megbetegedésekkel kapcsolatban végezték el a legtöbb vizsgálatot a mobiltelefonokon. Ez feltehetően azért van így, mert a sugárzás szó az emberekben félelmet kelt, ugyanis egyből a radioaktív sugárzásokra és azok rákképző hatására asszociálnak. Ezek a félelmek a kutatókat arra ösztönözték, hogy elsősorban ebben az irányban végezzenek vizsgálatokat.

Nagyon kevés vizsgálat mutatott valamilyen pozitív eredményt. Az egyik ilyen eredményt 1995-ben mutatta ki Henry Lai [8], aki alacsony teljesítményű modulált RF sugárzás hatására DNS száltöréseket tapasztalt. Azonban a kísérleteket azóta sokan megismételték, de száltöréseket nem tapasztaltak. Az eredményt feltehetően a mérés során valamilyen mellékkörülmény okozhatta. A kapott eredményt amiatt is vitatják, mert a Lai által használt sugárzás modulációja inkább radarimpulzusokhoz volt hasonlatos, mintsem a mobiltelefonokéhoz [4], továbbá, amint azt a 2.2 fejezetben olvashattuk, a mikrohullámú sugárzás csaknem egymilliószor gyengébb a kémiai kötések energiájához képest.

Egy másik pozitív eredmény 1997-ben látott napvilágot, amikor egereken végzett kísérletekkel kimutatták, hogy a GSM szabványnak megfelelő modulációjú 900 MHz-es sugárzás megnövelte a nyirokmirigy-daganattól származó pusztulást. Azonban az eredmények nem általánosíthatók, ugyanis a besugárzott egerek egy speciális, génmanipulált fajtához tartoztak, amelyek egyébként is rendkívül könnyen kaptak rákot [1],[2].

Egy az USA-ban végzett kísérletsorozat azt mutatta, hogy tumorokkal beoltott patkányok esetében a primer tumorok száma nem különbözött a besugárzott és a nem besugárzott patkányok esetében, de a tumorok az exponált állatokban hamarabb jelentek

meg. Azonban újabb kísérletek nem tudták alátámasztani ezt az eredményt, sőt egy kísérlet azt mutatta, hogy a besugárzott állatok állapotában inkább javulás mutatkozott [1]. Ez azt jelenti, hogy ha van is az RF sugárzásnak rákkeltő hatása, az annyira csekély mértékű, hogy eltörpül a kísérletek szórása mellett.

A legtöbb vizsgálat azt mutatja, hogy a mobiltelefonok által kibocsátott RF sugárzás nem rendelkezik rákképző hatással és nincs hatással egy már meglevő daganat fejlődésére sem. Ezt mutatta számos szövettani vizsgálat (például az Esseni Egyetem Genetikai Intézetének kísérlete [2] vagy az USA-ban agyszövetbe beoltott tumorokon végzett kísérletek [1]), állatokon végzett vizsgálatok (Adey és kollégái patkánykísérletei (1999) vagy Repacholi és kollégái egérkísérletei (1998) [4]) és epidemiológiai vizsgálatok is (egy Svédországi kutatócsoport által készített tanulmány [2], az Egyesült Államokban végzett epidemiológiai vizsgálatok [16] vagy a Memorial Sloan-Kettering Rákkutató Központ által 2000-ben közzéadott felmérés [17]).

3.2.3. Agyi tevékenységre gyakorolt hatások

A 2.2.2. fejezetben már volt róla szó, hogy a rádióhullámok hatással voltak patkányok EEG-jére. Arról is szó volt, hogy a modulált rádióhullámok jelentősen képesek megváltoztatni a sejtek (például agysejtek) ionegyensúlyát és ezáltal az agyi folyamatokra hatni. Hasonló hatásokat tudtak megfigyelni embereken, mobiltelefon-sugárzással végzett kísérletekben.

NMT-450 és GSM-900 szabvány szerinti rádióhullámokkal besugárzott önkénteseknél azt tapasztalták, hogy az EEG spektrum teljesítménye kismértékben erősödött. Az erősödés leginkább az alfa (7-13 Hz) agyhullámok teljesítményén látszott [18]. Egy másik tanulmány szerint a GSM-900 szabvány szerinti rádióhullámokkal besugárzott személyek EEG-jében a 7,5 – 10 Hz tartományba eső alfa hullámok teljesítménye akár 54%-kal is megnőhet [19]. A teljesítmény növekedése csak a besugárzás idejére jellemző. A DCS-1800 szabványnak megfelelő sugárzásnál nem tapasztaltak lényeges eltérést. Ennek oka az lehet, hogy a magasabb frekvenciák gyorsabban csillapodnak a fejben, továbbá ennél a szabványnál kisebb a kisugárzott teljesítmény az előzőekhez képest.

Sokan vizsgálták azt, hogy a mobiltelefon-sugárzás okozta gyenge agyi stimuláció okoz-e eltéréseket a vizsgált személyek reakcióidejében és egyéb agyi funkcióiban. Több tanulmány a reakcióidők kis mértékű felgyorsulásáról számol be [4],[2]. A

kognitív funkciókban (döntéshozó képesség, irányított figyelem, rövid és hosszú távú memória) nem tapasztaltak szignifikáns eltérést [20].

Az agyi tevékenységeken keresztül az egész szervezetre gyakorolt hatásokat is megvizsgálták. Azt tapasztalták, hogy a mobiltelefon-sugárzás hatására rövid időre kis mértékben (maximum 5-10 Hgmm-rel) emelkedhet a vérnyomás [4],[21]. Ez az enyhe vérnyomás-emelkedés azonban nem okoz egészségügyi problémát [21].

3.2.4. Rádiófrekvenciás hiperérzékenység

A lakosság kb. 0.2%-a azt vallja magáról, hogy különlegesen érzékeny az elektromágneses térre és az elektromágneses tér kedvezőtlenül hat rájuk [2]. Svédországban a hiperérzékeny emberek már saját szervezetet hoztak létre [23]. A leírt hatások nagyon változatosak: gyengeség, fáradtság, alvászavarok, fejfájás, fájdalmak az izmokban, hallási problémák stb.

Az Európai Közösség "Possible Health Implications of Subjective Symptoms and Electromagnetic Fields" néven egy vizsgálatsorozatot indított, amelynek eredményét 1997-ben adták közre. Eszerint azonban semmilyen kapcsolatot nem lehetett megállapítani a kis teljesítményű elektromágneses terek és az elektromágneses hiperérzékenység, illetve annak szimptómái között. Az 1998-ban megrendezett COST 244bis találkozón közzéadott kutatási eredmények szerint szintén semmilyen kapcsolat nem mutatható ki a szimptómák és a sugárzás között [22].

Mind ez idáig nem nyert bizonyítást, hogy az igen alacsony intenzitású elektromágneses terek nem-termikus hatásai egészséget károsítók lehetnek. A kérdés végleges tisztázásánál azonban problémát jelent, hogy a hatások hiányáról nehéz tudományos bizonyítékot szolgáltatni [2].

3.2.5. Elektromos berendezésekre gyakorolt hatás

A leggyakoribb elektromágneses kompatibilitással (EMC-vel) összefüggő kérdés a szívritmus-szabályozókkal (pacemakerekkel) kapcsolatos. A bázisállomások környezetében a lakott területeken a térerő nagysága nem éri el azt a szintet, amely a pacemakerknél bármilyen problémát okozna. A kézikészülékek közelsége és teljesítménye azonban van akkora, hogy zavaró hatásokat okozzon [1].

Különböző kutatócsoportok vizsgálatokat végeztek levegőben, illetve a testfolyadékoknak megfelelő folyadékban levő pacemakereken, valamint pacemakerrel élő embereken. A kutatócsoportok 4-35%-ban találtak valamilyen rendellenességet a pacemakerek működésében mobiltelefonok hatására.

Három fő rendellenesség típus léphet fel: az első, hogy a rádiótelefon készülék által kisugárzott RF jel olyan hamis elektromos jelet kelt, amely az ingerlő impulzus leállítását okozza. A második, hogy a pacemaker félvezető alkatrészein keresztül az RF jel demodulálva és felerősödve, az ingerlő impulzusra szuperponálva megjelenik, amely nem kívánt ingerlést okozhat. A harmadik, hogy az RF expozíció a pacemakerek program állapotát esetleg megváltoztatja.

A kutatócsoportok szerint rendellenességek csak akkor jelentkeztek, ha a telefon mindössze néhány cm-re volt a pacemakertól. Az 1800 MHz-en működő telefonok esetében nem észleltek zavaró hatást [1].

A legtöbb eredmény azt mutatja, hogy a kézikészülékeknél 20 cm-nél nagyobb távolságban, a hordozható készülékeknél 40 cm-nél nagyobb távolságban garantáltan semmilyen zavar nem mutatható ki. A vizsgálatokat végzők egyetértenek abban, hogy a pacemakert viselők ne a mellényzsebükben hordják a bekapcsolt készüléket és kerüljék az olyan helyzetet, amikor a készülék a pacemaker felett van [1],[2].

4. A rádiófrekvenciás sugárzás mérése

4.1. Dozimetriai alapfogalmak

Ahhoz, hogy a rádiófrekvenciás sugárzások hatását fel tudjuk térképezni, pontosan meg kell határozni a szervezetbe bejutó sugárzás paramétereit, mivel a hőhatások és az atermikus hatások is ezekkel a paraméterekkel vannak összefüggésben. Az elektromágneses energia, teljesítmény és egyéb paraméterek meghatározását hívják RF dozimetriának.

Az RF dozimetriát az alkalmazott módszerek alapján két típusra lehet bontani: az elméleti dozimetria a paramétereket egyszerűsített matematikai modellek alapján próbálja kiszámítani, míg a kísérleti dozimetria mérési eljárásokkal és kísérletekkel megméri a vizsgált paramétereket [5]. Mi most a kísérleti dozimetriával fogunk foglalkozni.

Egy másik felosztás a vizsgált sugárzás alapján történik: vizsgálhatjuk ugyanis a készülékekből kijövő (emittált) sugárzás értékét (ezt a vizsgálatot denzitometriának is szokták nevezni), valamint vizsgálhatjuk egy adott szövetben elnyelődött (abszorbeált) sugárzás nagyságát [5]. Mind a két vizsgálati módszer nagyon fontos. Az előbbi vizsgálattal azt lehet megmondani, hogy egy készülék milyen sugárzási környezetet hoz létre, az utóbbival pedig azt lehet megmondani, hogy egy adott sugárzási környezetben milyen hatások lépnek fel a szövetben.

4.1.1. Az emittált sugárzás vizsgálata

Az emittált sugárzás vizsgálatánál szét szokták választani a sugárzó berendezés közelében mérhető térerősségek és a távoli térben mérhető térerősségek vizsgálatát. A két térrész közötti határvonal távolságát gyakran szokták a következő képlettel megadni [5]:

$$I \cong \frac{2D^2}{\lambda}, \quad (4.1.)$$

ahol λ a rádióhullámú sugárzás frekvenciája, D a sugárzóegység legnagyobb mérete, I pedig a határvonal távolsága.

A távotérben a terjedő hullámot síkhullámnak tekinthetjük. Ekkor az elektromos térerő vektora merőleges a mágneses térerő vektorára és mindketten merőlegesek a terjedés irányára, ezért ezt a hullámot TEM-hullámnak is hívják. Az elektromos és

mágneses térerő hányadosa (ami megadja a hullámimpedanciát), konstans érték minden pontra. Az értéke vákuum (és levegő) esetén 377Ω . Ilyenkor az elektromágneses hullám által szállított energia szinuszos gerjesztés esetén csak a mágneses vagy csak az elektromos térerő ismeretében is könnyen számolható:

$$S = \frac{E^2}{Z} = H^2 Z, \quad (4.2.)$$

ahol E az elektromos térerő effektív értéke, H a mágneses térerő effektív értéke, Z a hullámimpedancia, S pedig a teljesítménysűrűség értéke, ami megmutatja, hogy egységnyi felületen mekkora teljesítmény áramlik keresztül. Értékét W/m^2 -ben vagy mW/cm^2 -ben szokás megadni (ez utóbbiban adtam meg az előző fejezetekben felsorolt teljesítménysűrűség értékeket).

A sugárzó tárgyak a távoltérben pontszerű testeknek foghatók fel és ilyenkor elmondhatjuk, hogy a távoltérben az energia a távolság négyzetével arányosan csökken.

A rádiófrekvenciás mérések nagy része a sugárzó közelterében zajlik. Ilyen helyzet fordul elő például orvosi rádióhullámú berendezések (pl. diatermiás berendezések) vagy a mobiltelefonok vizsgálata esetén. Ilyen közelségben a sugárzás nem fogható fel síkhullámnak, továbbá a mágneses és elektromos erőter nem feltétlenül merőleges egymásra. A sugárzó tárgyat sem tekinthetjük pontszerűnek és gyakran az erőteret a besugárzott tárgy is módosítja. A hullámimpedancia is változik: nem is biztos, hogy valós érték lesz. A pontos értékeket ilyenkor mindenképpen szimulációval vagy mérésekkel kell meghatározni.

4.1.2. Az abszorbeált sugárzás vizsgálata

Ahhoz, hogy a biológiai szövetekben elnyelt sugárzás mennyiségét ki tudjuk számítani, ismerni kell a különböző szövetek elektromos tulajdonságait, úgymint a szövet mágneses permeabilitását, elektromos permittivitását és vezetőképességét.

A biológiai szövetek mágneses permeabilitásáról elmondhatjuk, hogy az nagyon kicsi, gyakorlatilag egyenlő a szabad tér permeabilitásával [5]. Nagyon ritka kivételt jelentenek az olyan szövetek, amelyek magnetitzemcséket tartalmaznak. A magnetit tartalmú sejtek elsősorban bizonyos baktériumokban, halfajtákban és madarakban fordulnak elő. Ezeknél az élőlényeknél a navigációban játszanak szerepet. Eddig nem tudtak az RF elektromágneses mezők és a magnetit tartalmú szövetek között semmilyen kölcsönhatást kimutatni [4]. Ez azt jelenti, hogy a rádiófrekvenciás sugárzás mágneses

tere nem tud közvetlenül kapcsolatba lépni a szövetekkel, legfeljebb a szövetek vezetőképességén keresztül, mágneses indukcióval. Ekkor azonban már a létrehozott elektromos tér okoz hatásokat.

A szöveteknek mind a dielektromos állandója, mind pedig a vezetőképessége nagy. Ez a nagy víz- és iontartalom miatt van így. A víz relatív dielektromos állandója 80 körül van kisebb rádiófrekvenciákon és a frekvencia növekedésével csökken. A szövetek dielektromos állandója is ezen érték körül mozog. A vezetőképesség kb. 10 mS/cm körül van. Mind a két érték rendkívül változó attól függően, hogy milyen szövetet vizsgálunk. A relatív dielektromos állandó értéke akár 40 és 120 között is ingadozhat, a vezetőképesség pedig (elsősorban a víztartalomtól víztartalomtól és annak só és ásványi anyag tartalmától függően) kb. két nagyságrend értékű tartományban változhat [24].

A dielektromos állandó és vezetőképesség értékek attól is függenek, hogy milyen frekvencián mérjük őket. Ezenkívül erőteljesen nemlineárisak is: a vizsgálathoz használt elektromos térerő nagysága is befolyásolja az értéküket.

A szövet permeabilitásának, permittivitásának és a vezetőképességének ismeretében tudjuk kiszámítani adott frekvencián a szövet hullámimpedanciáját:

$$Z = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\epsilon}}, \quad (4.3.)$$

ahol μ a mágneses permeabilitás, ϵ az elektromos permittivitás, σ a szövet vezetőképessége, ω a körfrekvencia Z pedig a hullámimpedancia. A hullámimpedancia ismerete azért fontos, mert ez alapján mondható meg, hogy a levegőben terjedő elektromágneses sugárzás mekkora hányada jut be a szervezetbe és mekkora hányada verődik vissza róla:

$$T = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}; \Gamma = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad (4.4.)$$

ahol Z_2 a szövet impedanciája, amibe a sugárzás behatol, Z_1 a külső tér impedanciája, amiből a sugárzás érkezik, T a transzmissziós tényező, Γ pedig a reflexió-tényező ($T + \Gamma = 1$).

Az elnyelt elektromágneses energia a következőképpen számolható ki a szövet vezetőképességének és a szövetbe behatolt elektromos erőternek a függvényében:

$$W = \int_{T_1}^{T_2} \int_V \sigma(t, dv, E(t, dv)) \cdot |E(t, dv)|^2 dv dt, \quad (4.5.)$$

ahol σ és E a szövet vezetőképessége illetve a térerő pillanatnyi értéke az adott dv térfogatban és az adott t időpontban, W pedig a T_1 és T_2 időpontok között, V térfogatban elnyelődött energia. Ez a képlet figyelembe veszi, hogy a térerő és a szövetek vezetőképessége nem feltétlenül homogén és időben változhat, sőt a képlet a szövetek nemlinearitását is figyelembe veszi, azaz, hogy a vezetőképesség a térerő nagyságának a függvényében változhat.

A fenti képlet az elnyelt energiát a térfogathoz rendeli hozzá. A gyakorlatban azonban gyakran az energiát a besugárzott szövet tömegéhez viszonyítják. Ekkor a képlet a következőképpen módosul:

$$W = \int_{T_1}^{T_2} \int_M \frac{\sigma(t, dm, E(t, dm))}{\rho(t, dm)} \cdot |E(t, dm)|^2 dm dt, \quad (4.6.)$$

ahol ρ a dm szövetrész sűrűségét jelenti a t időpontban. A két integrál belsejében levő formula – amely az adott sűrűséggel rendelkező, infinitezimálisan kicsi tömeg által elnyelt teljesítményt írja le – külön nevet is kapott. Ezt a fogalmat fajlagosan elnyelt teljesítménynek hívják és az angol elnevezése (Specific Absorption Rate) után a SAR rövidítéssel jelölik.

4.2. RF mérőberendezések

A rádiófrekvenciás mérések során használatos műszereket két csoportra lehet bontani: keskenysávú és szélessávú berendezésekre.

A szélessávú berendezések érzékenysége frekvenciától független és nem adnak információt a detektált sugárzás spektrális eloszlásáról. Ilyen berendezésekkel jól kimutathatók a környezetben az olyan pontok, ahol a korlátozásokat meghaladja az összesített térerő. Ezekre a készülékekre jellemző, hogy kisméretű antennákat tudnak hozzájuk építeni, ezért jól használhatók közeltérben végzendő vizsgálatokhoz (pl. mobiltelefonok közelterének vizsgálata) és az általuk okozott zavarás (az antenna árnyékolása, az erővonalak eloszlásának megváltoztatása) csak minimális. Ezek a berendezések általában átlag térerőket szoktak mérni és a modulált jeleknél a modulációt nem képesek analizálni [5].

A másik készüléktípus a vékony frekvenciasávban dolgozó készülékek családja. Ide tartoznak a spektrumanalizátorok és a mérővevők. Ezek a berendezések általában speciális, viszonylag nagy méretű és gyakran hangolható antennákkal rendelkeznek, amihez egy mérőegység kapcsolódik. A mérőegységgel a rögzített bemenőjelen összetett adatfeldolgozást lehet végezni [5]. A nagy antennaméret miatt köztérben ezek a készülékek nem túl pontos eredményeket adnak vissza. A jó antennának és a kis sáv szélességnek köszönhetően viszont nagyon nagy érzékenységgel rendelkeznek (a szélessávú berendezések érzékenysége jóval kisebb). Az ilyen berendezésekkel egy kiválasztott készülék távolterében (pl. bázisállomás távoltere) lehet jó méréseket végezni.

Mind a széles- mind a keskenysávú berendezések a következő részegységekre oszthatók fel:

- antenna
- elvezetés
- mérőerősítő
- megjelenítő és tárolóegység

A megjelenítő és tárolóegység ma már szinte mindenütt digitális eszköz. Erről nem szükséges részletesebben beszélni. Nézzük viszont meg a másik három részegységet.

4.2.1. Az antenna

Szélessávú berendezéseknél antennaként dipólantennákat, dipólhurkokat, érzékelőként bolométereket, termoelemeket vagy négyzetes tartományban működő diódákat szoktak használni. Dipólok segítségével az elektromos erőteret detektálható, dipólhurkok segítségével pedig a mágneses erőteret alakítható át elektromos jellé. Általában három dipólt, illetve dipólhurkot szoktak egyszerre használni. A három antennarészt egymásra merőlegesen szerelik össze, így nagyon jól meg tudják közelíteni az ideális izotróp antenna tulajdonságait, azaz a kapott antenna érzéketlen lesz az RF tér irányára és polarizációjára. Diódás érzékelő alkalmazása esetén a tér három komponensét vevő antennák jeleit közvetlenül az antenna végénél elhelyezett négyzetes detektorok az egyenáramú jeleket összeadják és ezt vezetik tovább a mérőerősítőbe. Az egyes térkomponensek négyzetösszege a mérni kívánt teljesítménysűrűséggel arányos.

A bolométerek működésének a lényege, hogy a bennük elnyelődött RF teljesítményt hővé alakítják és valamilyen eszközzel a hőmérséklettel arányos ellenállásváltozást szolgáltatnak, melyet mérőhidakban mérnek.

Termoelemes érzékelőnél a kimeneti termofeszültség a termoelemre jutó RF teljesítménnyel arányos. Mind a bolométer, mind pedig a termoelem által szolgáltatott elektromos jel változása a teljesítmény változásával arányos, azaz ezek az eszközök miután hőhatás alapján működnek négyzetes karakterisztikájúak. A teljesítménysűrűségmérő mérőfejek leggyakrabban használt változatában az antenna és az érzékelő elemeket egybe építették. A három egymásra merőleges antenna termoelektromos fém párokból álló rendszerből épül fel (például bizmut és antimon fémlemezkekből). A lemezek két ponton vannak összerősítve. Az egyik pontot melegíti az RF sugárzás, a másik pedig a referenciapont. A lemezek végén mérhető termoelektromos feszültség arányos lesz az érzékelő utáni termoelemben elnyelődött RF teljesítménnyel. Léteznek egyéb érzékelők is, például, amelyek egy gázteret melegítenek és a jelet nyomásmérő segítségével alakítják át elektromos jellé, de ezek nem terjedtek el a gyakorlatban.

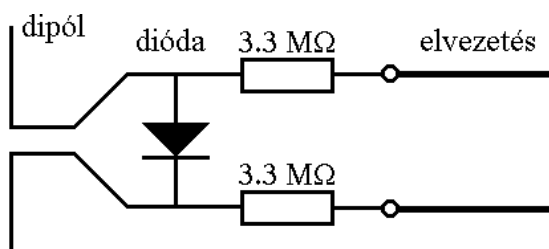
Keskenysávú berendezéseknél az elektromos erőteret szokták detektálni. Ehhez például dipólantennákat, szélessávú logperiódikus antennákat vagy tölcsérantennákat használnak. Gyakran használnak irányított, keskenysávú antennákat az érzékenység növeléséhez, például Yagi-antennákat.

4.2.2. Az elvezetés

Az antenna elvezetését úgy kell megoldani, hogy az elvezetés ne működjön hatékony antennaként. Ez fémes vezetőből készült elvezetés esetén az elektromos térre merőleges, így vele elvileg csatolatlan vezetékrendezéssel oldható meg. Ha a tér polarizációja nem ismert, akkor rossz vezetőképességű anyagból készült vezetékkel, vagy a térrel csatolásba nem kerülő optikai kábellel szokták az elvezetést megoldani. Ez utóbbi esetben olyan érzékelőre van szükség, mely az RF teljesítménnyel arányos optikai jellemző változást hoz létre. Nemcsak az antennaelvezetések és a mérendő tér csatolatlanságára kell ügyelni, hanem a kísérlet során használt egyéb mérővezetékekre is, például az EEG elektródokra. Erre azért van szükség, mert az elvezetések antennaként működnek : képesek az elektromos erőter egy részét "összegyűjteni" és az

antenna utáni egyenirányító egységbe továbbítani, továbbá el tudják torzítani a mérendő erőteret.

Az elvezetések ilyenkor nagy ellenállású vezetőkkel szokták elkészíteni, például vékony fém- vagy grafitrétegből. A nagy ellenállású vezeték erőteret módosító hatása jóval kisebb. A módosító hatást még azzal is csökkenteni szokták, hogy a vezetékre rákapcsolódó antenna és egyenirányító egység után nagy értékű ellenállásokat kötnek (4.1. ábra). Így a vezeték által összegyűjtött elektromos tér az ellenállásokon keresztül csak nagymértékben leosztva jut a kis ellenállású egyenirányítóra.



4.1. ábra: Az antenna, egyenirányító és elvezetés kialakításának vázlata.

4.2.3. A mérőerősítő

A szélessávú eszközök elvezetésén mérhető néhány mV-os feszültséget mérőerősítők segítségével erősítik fel feldolgozható szintre. Körülbelül néhány 100-szoros erősítésre van szükség. A mérőerősítővel szembeni fő követelmény a nagy bemeneti ellenállás (több $G\Omega$) és nagyon kicsi bias áram, mert egyébként a több $M\Omega$ -os ellenállású antenna elvezetésén emésztődik föl a jel nagy része, illetve az erősítő szivárgási árama torzítani fogja a mérést [25]. A másik fő követelmény az erősítő kis linearitási hibája és a nagy kivezélhetőség, hogy kellően széles mérési tartományokban lehessen dolgozni és a mérés kellően pontos legyen. Az erősítők általában erősen aluláteresztő jellegűek, hogy az antenna elvezetés ellenállása által okozott Johnson-zaj és a rendszerbe kapacitív és induktív úton bekerült hálózati 50 Hz hatásait minél jobban lecsökkentsék.

4.3. Fantomok

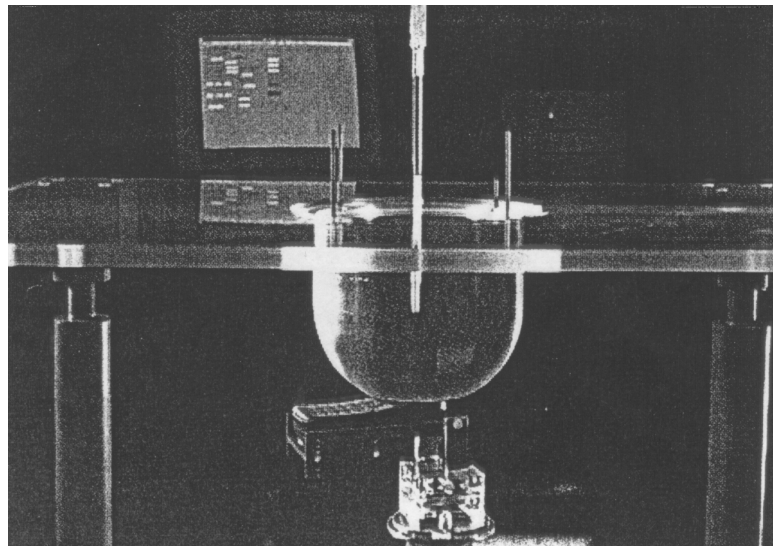
Az abszorbeált teljesítményméréseknél általában nem élőlényekbe szokták az antennákat belenyomni, hanem a vizsgálatokat próbatesteken, az ún. fantomokon végzik. Mivel a vizsgálatok mindig az ember biztonságára vonatkoznak, ezért a

fantomok legtöbbje az emberi testet vagy az emberi fejet modellezi. A mobiltelefonok vizsgálatánál szinte mindig az emberi fejben elnyelődött sugárzásról van szó, ezért a következőkben az emberi fejet ábrázoló fantomokról lesz részletesen szó. A fantomokkal szemben több követelmény merül fel:

- kellő pontossággal kell modellezniük a valódi test formáját,
- kellő pontossággal kell modellezniük a valódi test elektromos paramétereit,
- szabványosaknak kell lenniük, hogy bárhol könnyen elő lehessen állítani az ugyanolyan tulajdonsággal rendelkező fantomot és azzal megismételhető legyen egy adott kísérlet.

Három mérőfej fantom forma terjedt el a gyakorlatban: a kanonikus, az általános és a realiztikus [26].

A kanonikus fantomot az Alcatel cég készítette. Ez a fantom egyszerű geometriájú: a formája egy síklappal csonkolt félgömb (4.2. ábra). A sík felület modellezi a fület, amihez a mobiltelefont helyezik. A félgömb cukor, só és gombaölöszer keverékének vizes oldatát tartalmazza, amivel beállíthatók az agyra jellemző elektromos vezetés és permeabilitás értékek. A fantom fölül nyitott, hogy a mérőantennát bele lehessen helyezni a folyadékba.



4.2. ábra: A kanonikus fejfantom.

Az általános fantomot a zürichi Egyetemen, a BioEM/EMC laboratóriumban fejlesztették ki. Ez a fantom sokkal jobban megközelíti az emberi fej formáját (4.3. ábra). A fantom formája 52 felnőtt ember arcmeretei alapján lett elkészítve. Ehhez nagyon hasonló fantomot használnak Amerikában is. Ott az amerikai katonák fejméretei

alapján készítették el a fantom formáját. Itt is a fantom belsejében cukor, só és gombaölőszer vizes oldata van.



4.3. ábra: Az általános fejfantom.

A realiztikus fantomot MRI (**m**agnetic **r**esonance **i**maging) mérések alapján készítették el (4.4. ábra). Ez a fantom az eddigiekkel szemben réteges belső szerkezetű: külön modellezték a bőr-, csont- és agyszövetet. Az agyszövetet itt is folyadékkal modellezzik, hogy bele lehessen nyomni a mérőantennát.



4.4. ábra: Realisztikus fejfantom.

Általában az első két fantomot szokták használni, mivel azok könnyebben elkészíthetőek. Összehasonlító mérésekkel kimutatták, hogy ezeknek a fantomoknak a használata tulajdonképpen előnyös, mert a bennük mérhető SAR értékek a homogén belső szerkezet miatt kicsit magasabbak, mint a realiztikus fantomban, tehát jó felső becslő korlátot tudnak adni az emberi fejben fellépő értékekre.

A mérésekhez ritkán gél fantomokat is szoktak használni [27]. Ezek a fantomok zselészerű, átlátszó anyaggal vannak kitöltve, amelynek az elektromos tulajdonságai megegyeznek az agyszövet elektromos tulajdonságaival. A zselé sót, felületaktív anyagot és valamilyen nagymolekulájú, zseléképző anyagot, például poliakrilamidot vagy gumizselét tartalmaz. Ebben a szerkezetben nem lehet antennával méréseket végezni. A mérést nagy energiájú RF sugárzással végzik, ami felmelegíti az átlátszó zselét és az a hőmérséklet függvényében opálósodni kezd. Ezzel a módszerrel nagyon jó képet lehet kapni a SAR térbeli eloszlásáról. Hátránya viszont a szükséges nagy RF térerő és, hogy pontos méréseket csak bonyolult optikai eszközökkel lehet végezni.

5. Mérőrendszer kifejlesztése mobiltelefonok RF sugárzásának méréséhez

Munkám során egy az Országos Sugáregészségügyi és Sugárbiológiai Kutató Intézetben (OSSKI) meglevő, mobiltelefonok RF denzitometriai vizsgálatához készült mérőrendszert kellett megismernem és továbbfejlesztenem.

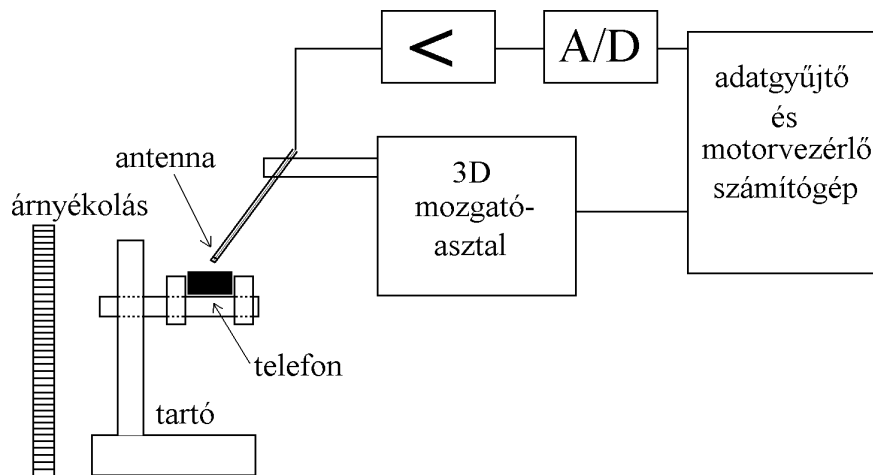
A rendszer a mobiltelefonok által adott pontban létrehozott elektromos térterjesztményt vizsgálja. A rendszerben eredetileg a mérési adatokat egy COM port-tal rendelkező METEX kézi multiméter gyűjtötte össze. Ennek a módszernek a hátránya az volt, hogy a műszer lassan továbbította az adatokat és emiatt a mérések nagyon sok időt igényeltek. Ez azért okozott problémát, mert így a méréseket csak hálózati töltőre csatlakoztatott mobiltelefonnal lehetett végezni, egyébként félő volt, hogy a mobiltelefon annyira lemerül a mérés során, ami teljesen tönkretetheti vagy legalábbis nagyon pontatlanná teszi a mérést. A problémát egy új A/D átalakító egység elkészítésével oldottam meg, amivel le lehetett rövidíteni a mérési időt.

Az eredeti rendszerben a méréseket egy 286-os számítógépen, DOS környezetben futó program vezérelte. A számítógépet azonban Pentium típusúra cserélték, az operációs rendszert pedig Windows 95-re. Ebben a környezetben az eredeti program nem volt képes helyesen működni (időzítési és kommunikációs interfész kezelési problémák léptek fel), így egy új, 32 bites Windows platformon futó szoftvert készítettem. Az új szoftver és az új A/D átalakító egység segítségével a méréseket gyorsabbá, szisztematikusabbá és pontosabbá lehetett tenni.

A tervezésekhez többfajta tervezést segítő programot használtam. Az A/D átalakító hardverét ORCAD 9.1-ben, a benne levő mikrokontroller felprogramozását MPLAB-ban, az új vezérlőszoftvert Visual C++ 6.0-ban készítettem, az A/D átalakító kalibrálását Visual C-ben írt programokkal és MATLAB szoftver segítségével készítettem el, a mérési eredmények kiértékelését és megjelenítését pedig a megírt kezelőszoftverrel, MATLAB-bal és GIMP grafikus szoftver segítségével végeztem.

5.1. A mérőrendszer felépítése

A vizsgálatokhoz használt mérési elrendezés blokkvázlata az 5.1. ábrán látható.



5.1. ábra: Mobiltelefonok denzitometriai vizsgálatához alkalmazott mérőrendszer blokkvázlata.

A szerkezet fő részei:

- mobiltelefon tartószerkezet és árnyékolás,
- mérőantenna, elvezetés és mérőerősítő,
- antennamozgató rendszer,
- A/D átalakító,
- adatgyűjtő és motorvezérlő szoftver és számítógép.

Nézzük meg most ezeket a részegységeket közelebbről.

5.2. Tartószerkezet és árnyékolás

A vizsgálandó mobiltelefont a mérés során egy plexiből készült tartószerkezetbe fogjuk be. A plexi alapanyag révén a szerkezet csak kismértékben befolyásolja az elektromos erőtér eloszlást, ezáltal a mérés pontosságát. A tartószerkezetben két plexipofát tudunk mozgatni és szorítócsavarral rögzíteni (ami szintén plexiből van). Így bármekkora méretű mobiltelefont szorosan be lehet fogni a szerkezetbe. A pofák belsején filckorongok vannak felragasztva, amelyek segítségével a telefon nem tud elcsúszni és a telefon külseje szoros befogás esetén sem sérül meg. A tartószerkezetnek nagyon vastag és súlyos plexi talpa van, ami megakadályozza a mérés során a szerkezet rezgését és elmozdulását. A tartószerkezet egy a mérőrendszer többi részétől különálló, rezgésmentes asztalon áll.

Mobiltelefon head-set mérése esetén a plexi tartó helyett egy vastag hungarocell tömböt raktunk a rezgésmentes asztalra, amire ragasztószalaggal felragasztottuk a

fülhallgatót. A hungarocell szintén nagyon kevésbé módosítja az elektromos erőter eloszlását.

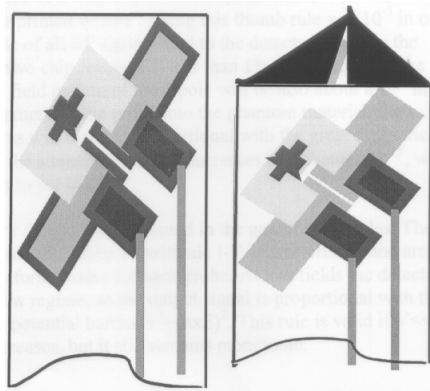
Azért, hogy a környezet elektromos zavaró hatását, illetve a mobiltelefon sugárzásának a környezetből való visszaverődését és ezzel a mérési eredmények meghamisítását a minimálisra csökkentsék, a tartószerkezetet és az asztalt alulról és két oldalról speciális, vezető anyagú szivacsból készült árnyékolólapokkal borították, amik elnyelik és nem verik vissza a telefonból kijövő sugárzást, valamint a külső sugárzás értékét is jelentősen csökkentik. Sajnos minden oldalról nem lehetett beborítani a mérőhelyet, mert akkor csak nehezen lehetett volna hozzáférni a szerkezethez. Márpedig a telefonhoz több oldalról is hozzá kell férni a mérés során, mivel az egyik oldalról nyúlik be a mérőantenna mozgatószerkezete, a másik oldalról pedig mi csatlakoztatjuk a telefonhoz a vezérlőkábelt és esetleg a töltőkábelt. A mérés további pontosításához jelenleg egy új mérőszoba készül, ahol a teljes szoba be lesz burkolva RF abszorbeáló szivaccsal. Így teljesen ki lehet zárni a környező zavarokat.

5.3. Mérőantenna, elvezetés és mérőerősítő

A mobiltelefon fölött egy miniatűr mérőantennát mozgatunk. Ezzel detektáljuk a telefon által kibocsátott elektromos erőteret és alakítjuk át a teljesítménnyel arányos jellé. Mivel mi most egy mobiltelefon közelterében végzünk vizsgálatot, ezért az antennával szemben a következő fő követelmények merültek fel [25]:

- Az antenna térbeli érzékenység karakterisztikája legyen izotróp, azaz az antenna ne legyen érzékeny az elektromos erőter irányára és polarizációjára.
- Az antenna legyen kis méretű, hogy jó felbontással tudja visszaadni a mobiltelefon által keltett erőter eloszlást.
- Az elektromos erőteret minél kevésbé zavarja az antenna és az elvezetés.
- Ha a későbbiekben fantomokban végzünk vizsgálatokat, akkor a fantom dielektromos struktúráját minél kevésbé módosítsa az antenna és az elvezetése.

Ezeket a követelményeket az 5.2. ábrán látható szerkezetű mérőfejjel lehetett kielégíteni.



5.2. ábra: Mobiltelefonok közelterének vizsgálatához alkalmazott mérőfej vázlata.

A mérőfejet 125 μm vastag poliészter hordozón, vastagréteg technikával alakították ki [25]. A hordozót háromszög alapú hasáb formájúra hajlították, az egyes oldalak végén egy-egy darab egymáshoz képest merőlegesen elforgatott dipólt alakították ki. A hasábszerkezet végei nyitottak, így fantomban való méréskor a szerkezet belsejébe be tud áramolni a folyadék és a dielektromos szerkezet alig módosul.

A három dipól együttesen képezi az izotróp antennaszerkezetet. Közvetlenül a dipólantennák talppontjára, az antennákkal párhuzamosan csatlakoznak az érzékelő és egyenirányító diódák. Szintén az antennák talppontjára csatlakoznak egy-egy 3,3 $\text{M}\Omega$ -os ellenálláson keresztül a grafit vastagréteg elvezetések. Az ellenállások hatására az elvezetések nem tudnak jelentős nagyságú RF feszültséget juttatni az egyenirányító diódákra. Az elvezetések fajlagos ellenállása 3,8 $\text{k}\Omega/\text{mm}$, a kapacitásuk pedig 5 fF/mm . Az ilyen paraméterekkel rendelkező elosztott paraméterű hálózat nagyon erős csillapítást jelent nagyfrekvencián, így az elvezetések végéről a mérőerősítőbe már egyenáramú jel jut.

Az egyenáramú jel arányos az adott pontban mérhető RF teljesítménnyel. Ez úgy lehetséges, hogy az egyenirányítást végző diódák exponenciális U/I karakterisztikával rendelkeznek. Az ezzel a karakterisztikával megvalósított egyenirányító karakterisztika kis jelszintek esetén jól közelíti a négyzetes karakterisztikát, így a kimenő feszültség jól közelíthető a bemenő elektromos térerő négyzetes függvényével.

A mérőerősítő egy 11 Hz-es törésponti frekvenciájú aluláteresztő RC szűrőt tartalmaz, amely segítségével jelentősen csökkenthetők a hálózati 50 Hz zavaró hatásai, a Johnson-zaj és a grafit elvezetések által produkált $1/f$ zaj. Az erősítő bemenete MOS tranzisztorokat tartalmaz, így a bemeneti ellenállás rendkívül nagy és a bias áram értéke mindössze 0,1 pA. Az erősítő burkolata és a nyomtatott áramköri lap le van földelve,

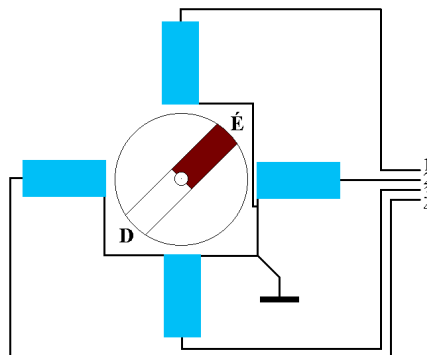
hogy a fémburkolat által összegyűjtött RF térerő ne tudjon a MOS tranzisztorok bemenetére hatni és ne zavarja a mérést.

5.4. Az antennamozgató rendszer

A mérőantennát – a kísérletek megismételhetősége miatt – nagy pontossággal kell mozgatni. Ezt az általunk használt mérőrendszerben egy Arrick MD2 típusú mozgatóasztallal oldották meg [28]. A mozgatóasztallal a mérőantennát a tér mindhárom irányába lehet mozgatni. Az asztal X, Y és Z mozgatóelemeit egy-egy léptetőmotor mozgatja a motorházba beépített fordulatszám-áttételen és a motorra szerelt görgőre tett gumiszíjon keresztül. A léptetőmotoroknak az az előnye, hogy pontosan lehet őket egyszerű vezérléssel mozgatni. Így nincs szükség szabályozóval rendelkező drága szervo motorra. Hátrányuk viszont, hogy a motor mozgása "darabos", mivel a motor mozgása léptetőimpulzusokkal történik. Emiatt a mozgás során az egész szerkezet rázkódik.

Azért, hogy ne lépjen fel csúszás az elemek mozgása során, a gumiszíjak fogazottak. Sajnos azonban csúszás lépett fel a motorok fémtengelye és a gumiszíjat mozgató görgő között is. Ezt a problémát úgy lehetett kivédeni, hogy a megvásárolt szerkezet motortengelyeit az OSSKI-ban utólag meglapolták és csavarmenetet fűrtak bele a görgő szorítócsavarja számára.

A berendezésben használt léptetőmotorok négy tekercset tartalmaznak, amivel egy mágneses forgórészt lehet körbe-körbe mozgatni (5.4.1. ábra). A motorok tekercseit a motorhoz tartozó meghajtóegységgel, egy számítógép párhuzamos portján keresztül lehet vezérelni. Így szabadon írhatunk a számítógépre bármilyen motorvezérlő programot, amivel a motorvezérlés sebességét és módját egyaránt kézben tudjuk tartani.



5.3. ábra: 4 tekercses léptetőmotor vázlatos felépítése.

A léptetőmotorokat 3-féle módon tudjuk vezérelni: teljes egyszeres, teljes kétszeres és féllépéses módban. Az egyes módokhoz tartozó tekercsvezérlési mintázatokat az V.1. táblázat tartalmazza.

V.1. Táblázat: motorvezérlési módokhoz tartozó vezérlési mintázatok

vezérlési mód:	vezérlési sorozat *							
teljes egyszeres	0001		0010		0100		1000	
teljes kétszeres	0011		0110		1100		1001	
féllépéses	0001	0011	0010	0110	0100	1100	1000	10010

* Az egyes mintázatokban a 0 kikapcsolt, az 1 pedig bekapcsolt tekercset jelent.

A teljes egyszeres és teljes kétszeres módok esetén a motor forgórésze négy léptetés alatt fordul körbe. A két módszer közötti különbség, hogy egyszeres vezérlés esetén egyszerre mindig csak egy tekercs van bekapcsolva, kétszeres vezérlés esetén egyszerre mindig kettő. Kétszeres vezérlés esetén a motor mozgató- és tartóereje $\sqrt{2}$ - ször nagyobb, ezáltal nagyobb terhelést képes a motor ugyanakkora sebesség mellett elviselni vagy ugyanakkora terhelés mellett nagyobb sebességen lehet járatni a motort lépéstévesztés nélkül mint egyszeres vezérlési módban. (Lépéstévesztés akkor fordul elő, ha a motoron levő terhelés adott sebességgel történő mozgatásához már olyan nagy erő kell, amit a tekercsek nem képesek előállítani. Ekkor kimaradhat egy teljes fordulat a mozgás során, amíg újra szinkronba kerül a forgórész és a forgó mágneses mező, vagy a motor akár teljesen le is állhat.)

Féllépéses mód esetén a motor forgórésze nyolc léptetés alatt fordul körbe. Ennek a léptetési módnak az előnye, hogy a pozíciót kétszer finomabban lehet megadni, mint a teljes lépéses módok esetében. A tartóerő értéke változó, attól függően, hogy milyen léptetőmintát adtunk rá utoljára a motorra. A legrosszabb esetben a tartóerő értéke az egyszeres teljes lépéses vezérlési mód erejével egyezik meg. A finomabb mozgatás miatt kicsivel nagyobb maximális sebesség engedhető meg a mozgatás során, mint egyszeres vezérlési módban.

A motorok házaiba szerelt fordulatszám-átτέtelek értéke és a motortengelyekre szerelt görgők mérete akkora, hogy mindhárom mozgatási irányban a teljes lépéses módokban 40 léptetés, féllépéses módban pedig 80 léptetés során mozog a gumisíj 1 centimétert.

A motorok használata során azt tapasztaltuk, hogy a motorokat érdemes féllépéses üzemmódban működtetni: ilyenkor a motor működése sokkal halkabb, a motor kevésbé rázkódik, a tekercsek pedig elég erősek ahhoz, hogy féllépéses módban az asztal elemeit és a könnyű antennát lépéstévesztés nélkül mozgassák.

Egy másik megfigyelés a motor sebességére vonatkozik: a motort érdemes viszonylag nagy sebességgel mozgatni. Jelenleg a vezérlőszoftver alapértelmezésben 10 ms-onként ad egy vezérlőimpulzust a mozgatandó motorra, azaz a mozgatási sebesség 1,25 cm/s. Ekkora sebességnél még garantáltan nincs lépéstévesztés, a motor rázkódása viszont olyan nagy frekvenciájú, amit a gumiáttétel és a nagy tömegű mozgóelemek már erősen csillapítanak. A vezérlőimpulzusokat azért is érdemes gyorsan váltogatni, mert ilyenkor a motorok tekercseiben nem képes nagy áram kialakulni. Ha hosszú ideig rajtahagyjuk egy tekercsen a vezérlést, akkor ott gyakorlatilag zárlati áram jön létre. Ilyenkor azt tapasztaltuk, hogy a motorok annyira felmelegedtek, hogy a burkolatukat nem lehetett megfogni.

Az előbb leírt ok miatt ahol csak lehetett, nem alkalmaztunk tartóerőt sem, azaz a mozgatás befejezése után levettük a vezérlőjelet a motorról, hogy az álló helyzet során ne alakuljon ki zárlati áram. Egyedül a Z irányban mozgó motoron kellett mindenképp tartóerőt alkalmazni, egyébként az antenna a mozgatás után lezuhant volna. A Z irányban mozgó motor éppen ezért viszont más típuszámú: sokkal kisebb teljesítményű és kis melegedéssel bírja a folyamatos terhelést is.

Amire még külön figyelni kellett a mozgatás során, az a mérőfej rázkódása. A motorok hirtelen elindulása és megállása miatt a rugalmas, poliészter alapanyagú mérőfej elkezdett rezegni. Ez a rezgés csökkenthette volna a mérés pontosságát. Ezt a problémát úgy lehetett a legegyszerűbben kivédeni, hogy az adott pontba történő mozgatás után és a térérő-mérés előtt egy kis ideig még várakozott a rendszer, amíg a rezgések le nem csillapodtak. A szükséges várakozás értéke kb. 0,8 másodperc volt.

5.5. Az A/D átalakító részletes ismertetése

A mérőerősítő egység az elnyelt RF teljesítménnyel arányos analóg jelet szolgáltat. Ahhoz, hogy ezt a jelet számítógéppel el tudjuk tárolni és fel tudjuk dolgozni, a jelet digitalizálni kell. A korábbi mérőrendszerben ezt egy kommunikációs interfésszel rendelkező METEX multiméterrel oldották meg. Azonban egy multiméter túl drága erre a célra, és mivel csak másodpercenként 1 adatot képes továbbítani, ezért a

mérés lassan ment. A multimétert elemről lehetett működtetni, ez pedig drága és kényelmetlen megoldás. A műszer ezenkívül csak egyetlen feszültséget tudott egyszerre megmérni, viszont igényként merült fel az izotróp antenna X, Y és Z dipóljainak adatait külön-külön rögzíteni és feldolgozni. Ezért a rendszerhez egy új digitalizáló egységet terveztem.

5.5.1. Specifikáció, alapterv, alkatrészek kiválasztása

Az A/D átalakítóval szemben a következő követelményeket támasztották:

- A készülék legyen olcsó: a fejlesztéssel, bemérésekkel, átervezésekkel együtt 20 000 Ft-ból jöjjön ki.
- A készülékkel gyorsan és egyszerűen lehessen feszültségmérést végezni, a berendezés egyszerre adja vissza az X, Y és Z dipólon mért feszültségeket. A mérési frekvencia kb. néhányszor 10 Hz legyen, hogy gyorsan lehessen mérni. A mérési frekvencia pontos értéke és annak ingadozása nem kritikus.
- A feszültségmérést a számítógépről lehessen vezérelni: a számítógép jelezze az adatkérélmét és a készülék az éppen mért adatokkal válaszoljon vissza.
- Az átalakítás pontossága 1 V feszültség mérésénél kb. 0,1% legyen, és az eszköz kb. 0 - 4 V határok között legyen képes mérni.
- A készülék ne igényeljen külön tápforrást, hanem lehetőleg a számítógép valamelyik 5 V-os tápfeszültségét használja.

Az A/D átalakítás megvalósítására a fenti követelményeket figyelembevéve három lehetőség kínálkozott:

- Vásárolni egy A/D kártyát, telepíteni a számítógépre és programot írni hozzá.
- A/D átalakító IC-ket vásárolni és ezekkel megoldani a feladatot.
- A/D átalakítót tartalmazó mikrokontrollert vásárolni és ezzel megoldani a feladatot.

Az első módszert gyorsan elvetettem: az A/D kártyák rendkívül drágák: 50 000 – 100 000 Ft körül van az árak, tehát többszörösen kimerítené a rendelkezésre álló keretet. Ráadásul ez a feladat egyáltalán nem használná ki az olyan képességeiket, mint például a gyors és pontos mintavételi frekvencia.

A/D átalakító IC-k segítségével már olcsóbban meg lehet oldani egy ilyen feladatot: egy A/D átalakító IC ára 1 dollár körül van (külföldről kell őket beszerezni)

és olyan IC-ket is árulnak, amelyek soros port kimenettel is rendelkeznek, tehát a számítógép soros portjával könnyen össze lehet kötni őket. Azonban tovább elemezve és összehasonlítva ezt a megoldást a mikrokontrolleres megvalósítással, alulmaradt azzal szemben: mivel mi több csatornát szeretnénk egyszerre mérni, ezért több A/D átalakító IC-t kell beépíteni és az IC-k kimeneteit egy külön multiplexer egység segítségével kellene egy csatornára összeadni. (Esetleg megoldható a probléma esetleg úgy is, hogy egyetlen A/D átalakítót használunk és egy analóg multiplexer IC segítségével alakítunk ki több bemenetet). Az IC-k feszültségszintjeit a COM port feszültségszintjeihez illeszteni megint egy külön IC-t igényel. Ez legalább 5 darab IC-t jelent (1 db A/D átalakítót, 1 db oszcillátort, 1 db multiplexert, 1 db számlálót, ami a multiplexert vezérli és 1 db feszültségillesztőt). Az 5 IC használata nagyméretű NYÁK-ot jelent, márpedig a NYÁK jelenti a legnagyobb költséget.

Mikrokontroller alkalmazása esetén a mikrokontroller tartalmazza a multiplexert, az A/D átalakítót, a vezérlést és az oszcillátort is, tehát a NYÁK összesen két IC-t fog tartalmazni: a mikrokontrollert és a feszültségillesztőt. Így a NYÁK-on csak kevés vezeték fog futni és kevés alkatrész fog szerepelni, ezért a NYÁK kisebb és olcsóbb lesz. A kevesebb alkatrész miatt a hibalehetőség is kisebb a tervezés során.

A Magyarországon forgalomba hozott mikrokontrollerek közül [29] a PIC16C773-as típust választottam ki. Ez az eszköz egy 12 bites A/D átalakítót tartalmaz. Az A/D átalakítót az IC-be beépített 4,096 V-os referenciafeszültségről lehet működtetni. A feszültségfelbontása ezek szerint mindenféle jelfeldolgozási "trükk" nélkül 1 mV. Ez az IC tehát teljesíti mind a mérési határra, mind a mérési pontosságra vonatkozó specifikációkat. Hat darab analóg bemenettel rendelkezik, amelyek az IC-be épített analóg multiplexeren keresztül csatlakoznak az A/D átalakító egységre, tehát a több csatornás mérés is könnyen megoldható. Az IC mindössze 28 lábbal rendelkezik, tehát viszonylag kevés furatot és kevés helyet igényel a NYÁK-on. Az IC ezenkívül számos további jó tulajdonsággal is rendelkezik, mint például Power-up-Timer (PWRT), Oscillator-Start-up-Timer (OST) és Brown-Out-Reset (BOR) [30].

A PWRT és OST speciális időzítések. PWRT segítségével a mikrokontroller a tápfeszültség bekapcsolása esetén még 72 ms ideig RESET állapotban tartózkodik, hogy a bekapcsolási tranziensek (elsősorban a tápfeszültség-kapcsoló pergeése) lezajlódjanak és az eszköz csak ezután induljon be. Az OST segítségével a készülék az órajel-generátor beindulása után várakozik még 1024 periódust, hogy az oszcillációk

amplitúdója és frekvenciája stabilizálódjon. Ezen segítségek nélkül csak sokkal nehezebben, külön alkatrészek felhasználásával lehetne a biztonságos működést megoldani.

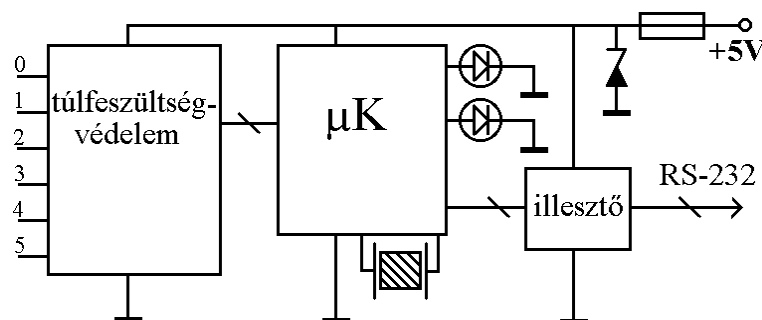
Brown-Out-Reset alkalmazása esetén a megépített eszköz RESET állapotba küldhető akkor, ha a tápfeszültség egy adott szint alá csökken. Erre esetünkben azért van szükség, mert a mikrokontroller és a feszültségillesztő IC még 3 V esetén is képes hiba nélkül működni, azonban ekkor már a mikrokontroller tokjába épített 4,096 V-os referenciafeszültség-generátor már iszonyatosan pontatlan és a készülék rossz eredményeket szolgáltat, ha csak nem teszünk ellene valamit. BOR segítségével a készüléket RESET állapotba kapcsolhatjuk, ha a feszültség például 4,4 V alá süllyed (ez az elkészített eszközénél meg is történt). Ezzel meggátoljuk a hibás mérések készítését.

A mikrokontroller 0 és 5 V-os digitális jelszintjeit az RS-232 szabványnak megfelelő –12 és 12 V-os feszültségszintekre konvertáló feszültségillesztő IC segítségével alakítjuk át. A kiválasztott IC típusa: MAX232C. Ez az IC általánosan elterjedt erre a használatra, olcsó, kis fogyasztású és jól tűri a túlfeszültségeket.

A berendezés alkatrészeinek a megvásárlása és a NYÁK elkészíttetése 12000 Ft-ba került, minden más munkát (NYÁK tervezés, összeforrasztás, mikrokontroller felprogramozás, bemérés) én végeztem el.

5.5.2 A hardver megtervezése

Az elkészített áramkör blokkvázlata az 5.4. ábrán látható (a részletes áramköri rajz az A Függelékben tekinthető meg).



5.4. ábra: Az A/D átalakító egység blokkvázlata.

Az eszköz egyetlen 5 V-os feszültségforrásról működik. Az 5 V-os feszültséget a készülék a számítógép billentyűzet-csatlakozójából nyeri. Hogy a készülék működése mellett a számítógép billentyűzetét is zavartalanul lehessen használni, ezért a készülék

tápcsatlakozója egyúttal billentyűzet-hosszabbítóként is ki van alakítva. A NYÁK-on a feszültségcsatlakozás egy kettős sorkapocs segítségével, bontható módon lett megoldva. A tápcsatlakozó lábainak bekötése a B Függelékben van leírva.

A készülék a tápfeszültséget egy olvadóbiztosítón és egy a készülék többi tagjával párhuzamosan kapcsolt 6,1 V-os Zener-diódán keresztül kapja. Az olvadóbiztosító véd a rövidzárlatok ellen, az olvadóbiztosító és a Zener-dióda együtt pedig megakadályozza, hogy a készülék többi része véletlenségből fordított polaritású tápfeszültséget vagy 5 V-nál jelentősen nagyobb tápfeszültséget kapjon és ettől tönkremenjen.

A részletes áramköri rajzon látható, hogy a készülék szűrőkondenzátorokat is tartalmaz, hogy a tápfeszültségen megjelenő zavarok ne okozhassanak mérési hibát. Közvetlenül az olvadóbiztosító után egy 100 μ F-os szűrőkondenzátort helyeztem el, az IC-k tápfeszültség lábaira pedig 100 nF-os kerámia szűrőkondenzátorokat raktam, hogy a nagyfrekvenciás hatásokat is biztosan kiszűrjem.

A PIC16C773 IC segítségével maximálisan 6 darab analóg bemenet alakítható ki. Mind a hat bemenetet megvalósítottam, mert a specifikációban előírt három bemenet melletti három tartalék bemenet megvalósítása nem igényelt sok további helyet a NYÁK-on és esetleg későbbi, áttevített kísérleteknél a tartalék feszültségmérő bemenetek jól hasznosíthatóak lesznek majd.

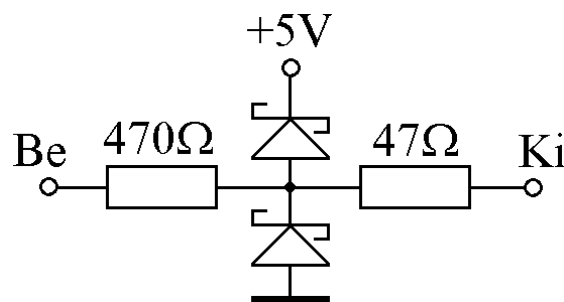
Az A/D átalakító másodpercenként 63 darab mintavételezést képes végezni. A mikrokontroller ugyan képes volna nagyobb frekvenciájú mintavételezésre is, viszont a korlátot az RS-232 vonalon történő adattovábbítás jelenti. Megtehettem volna, hogy a mikrokontrolleren belül nagyobb sebességgel mintavételezem a bemeneteket és a kimenetre az összegyűjtött értékekből képezett új értéket továbbítok. Azonban én nem alakítottam ki jelfeldolgozási funkciókat a mikrokontrolleren belül, mert ebben az esetben nem tudtam volna a mérések minden adatát (például a jelek amplitúdóeloszlását vagy varianciáját) közben tartani, sőt, a mikrokontroller véges számbábrázolása és fix pontos aritmetikája miatt még további hibákat, például kerekítési és túlcordulási hibákat vihettem volna be a rendszerbe. Ezekkel a hibákkal és a hiányosan ismert adatokkal nem tudnám megjósolni például, hogy egy adott zajszint mellett mekkora varianciával és mekkora torzítással tudom meghatározni a mérendő értékeket.

A készülék bemeneteinek belső ellenállása 40 M Ω . Ez azt jelenti, hogy ha be akarjuk tartani az előírt 0,1 % pontosságot, akkor a bemenetekre maximum 1,5 k Ω belső ellenállású feszültségforrások csatlakoztathatók. Ha ennél nagyobb belső ellenállású

egységet kapcsolunk a bemenetre, akkor a belső ellenállás és bemeneti ellenállás által létrehozott feszültségosztás értéke akkora lesz, hogy az A/D átalakító nem tudja garantáltan teljesíteni az előírt pontosságot [30]. Ez a viszonylag alacsony érték esetünkben nem okoz problémát, mert az A/D átalakítóra kapcsolt mérőerősítő kimeneti ellenállása 170 Ohm.

A készülék bemeneti ellenállása növelhető lett volna abban az esetben, ha követőerősítőkkel valósítjuk meg a bemeneteket. Ezáltal a készülék egyéb célokra is könnyedén felhasználható lett volna. Ezt azért nem tettem meg, mert a Magyarországon kapható műveleti erősítők között nem találtam olyan típust, amelyik képes lett volna garantálni 0 és 5 V-os meghajtófeszültség mellett a lineáris erősítést a 0-4 V be- és kimeneti feszültségtartományban. Kettős meghajtófeszültséget semmiképpen sem akartam létrehozni, mert -5 V feszültséget csak a számítógép alaplapijáról lehetett volna levenni, ez pedig jelentős beavatkozást jelentett volna a számítógép belső vezetékezésébe; 12 V feszültség pedig túlságosan sok lett volna a MAX232C IC-nek.

A bemenetek egy túlfeszültség-védelmi fokozaton keresztül kapcsolódnak a mikrokontroller bemeneteire. Egy bemenet védelme a következő módon néz ki:



5.5. ábra: Az A/D átalakító túlfeszültség-védelmi fokozatának felépítése.

Ha a bemeneti feszültség értéke 0 és 5 V közé esik, akkor mindkét Schottky-dióda zárt állapotban van. Ekkor a bemeneti és kimeneti pont között gyakorlatilag csak egy 517 Ω -os ellenállás látható. Abban az esetben, ha a bemeneti feszültség értéke $-0,3$ V alá csökken, az alsó Schottky-dióda vezetni kezd és nem engedi, hogy a kimeneten $-0,3$ V-nál kisebb feszültség jelenjen meg. Ha a feszültség 5,3 V fölé kerül, akkor a felső Schottky-dióda kezd el vezetni és a kimeneten a feszültség nem emelkedik tovább. A 470 Ω -os védőellenállás 0,5 W teljesítményű. Ezzel a készülék 16 V-os túlfeszültséget korlátlan ideig elvisel (ez védelmet jelent az ellen, ha például egy 12 V-os tápegységet kötnének véletlenül a bemenetre) és a statikus kisüléseket is minden sérülés nélkül

elviseli. Rövidebb ideig (amíg az ellenállás nem melegszik fel túlságosan) a védelem 100 V nagyságrendű feszültségimpulzusokat is elvisel.

A 47 Ω -os ellenállásra azért volt szükség, mert a mikrokontroller maga is rendelkezik belső túlfeszültség-védelemmel, azonban ez a védelem túlzottan kis teljesítményű védődiódákat tartalmaz. A 47 Ω -os ellenállás segítségével elérhető, hogy a védelem működése során a fellépő áramok legnagyobb része az általam beszerelt, nagyobb teljesítményű diódákon folyjon keresztül.

A mikrokontroller oszcillátorát egy 1,8432 MHz-es kvarckristály hajtja meg. Ennek a frekvenciának az egész számú leosztásával pontosan előállíthatók az RS-232 szabványban megengedett adattovábbítási sebességek. További előnye ennek a frekvenciának, hogy a mikrokontroller ilyen alacsony frekvencián nagyon kevés áramot vesz fel.

A mikrokontroller működését két darab LED jelzi: egy zöld és egy piros. Bekapcsoláskor vagy újraindítás után a LED-ek előbb együttesen, majd külön-külön felvillannak. Így győződhetünk meg arról, hogy a mikrokontroller hibátlanul működik. Működés közben a zöld színű LED a mikrokontroller lekérdezési sebességének megfelelő (néhány 100 kHz-es frekvenciával) villog. Így a LED meghajtófeszültségét teszteleseknél lehet felhasználni (például oszcilloszkópon vizsgálhatjuk). A piros LED akkor villan fel, ha egy mérési kérelem érkezett. A mérési kérelmet egy speciális karakter elküldésével lehet a gépnek megadni (a karakter tulajdonságai és a mérési adatformátummal kapcsolatos egyéb információk a C Függelékben olvashatók).

Az áramkör megtervezésénél törekedtem a könnyű tesztelhetőségre és esetleges meghibásodás esetén az alkatrészek könnyű cseréjére. Az elkészült NYÁK-on négy darab felcímkézett tesztpont található, amelyekkel vizsgálható a földpont, a tápfeszültség, valamint az RX és TX adattovábbító vonalak állapota a bemérések során. A két LED is sokat segített nekem a tesztelesek és bemérések alatt.

Mind a MAX232C, mind pedig a PIC16C773 IC egy-egy precíziós foglalatban helyezkedik el, így tönkremenetelük esetén az IC-ket forrasztás nélkül lehet cserélni. A NYÁK-on található még egy RESET jumper, amivel az áramkört egy esetleges hibás logikai állapotba kerülés esetén újra lehet indítani.

5.5.3. A mikrokontroller vezérlőszoftverének elkészítése

A mikrokontroller vezérlőszoftverét a D Függelékben, valamint a lemezmellékleten találhatjuk meg. A szoftver folyamatdiagramja az 5.6. ábrán látható.

A program működésének alapja, hogy az inicializálás és a működést jelző LED-villogtatás után egy végtelen ciklusban fut, ahonnan csak a kommunikációs porton beérkezett adatkérelem jel által okozott megszakítás billenti ki a rendszert. A megszakítás rutinban történik a mérés és az adattovábbítás. Ezután a program ismét visszatér a végtelen ciklusba, a legközelebbi megszakításig.

A program induláskor inicializálja a mikrokontroller paramétereit. Ekkor állítja be, hogy a mikrokontroller milyen megszakításokat fogadhat, hogyan működjön az A/D átalakító, hogyan működjön az USART kommunikációs port és, hogy a mikrokontroller melyik lába legyen digitális kimenet és melyik digitális vagy analóg bemenet.

A megszakítások közül egyedül az adat vétel megszakítást választottam ki (mivel ezzel a megszakítással fogom kérni a számítógép részére a mérési adatokat). Az megszakítást itt csak kiválasztom, de még nem engedélyezem, nehogy az inicializálás befejezése előtt befusson egy adatkérelem és ezzel félrefusson a program.

Az A/D átalakítót és referenciafeszültségét folyamatosan bekapcsolva tartom. Ebben az esetben ugyan a referenciafeszültség-generátor folyamatosan 5 mA-t fogyaszt, viszont nem kell folyton be- és kikapcsolni a generátort és nem kell a generátor bekapcsolási tranzienseivel lassítani vagy pontatlanabbá tenni a mérést.

Az USART-ot 9600-as baud rate sebességre programoztam fel. Ekkor a kommunikáció már kellően gyors (1 ms-onként lehet elküldeni egy karaktert), viszont akár 10 m hosszú soros kábelt is rákapcsolhatunk a mérőberendezésre, mert ekkora sebességnél a kommunikáció még nem érzékeny a zavarokra (a Windows-nál is ez az alapként beállított érték).

Következő lépésként a program a LED-ek villogtatásával jelzi, hogy a mikrokontroller helyesen működik. Először a program mindkét LED-et egyszerre felvillantja, majd előbb a piros LED-et és utána a zöldet villantja fel. A villogások 0,28 másodpercig tartanak.

A villogtatások után érkezik el a program a főciklusba, ahol engedélyezem a megszakítást. A ciklusban folyamatosan, nagy frekvenciával villogtatom a zöld színű LED-et, amivel ellenőrizhető a működés.

Ha egy karakter érkezik a soros porton keresztül, akkor ez egy megszakítást vált ki és le fog futni a megszakítás függvény. A program bekapcsolja a piros színű LED-et és ha az érkezett karakter megegyezik az adatkérelem karakterrel, akkor a készülék sorban lekérdezi a feszültségeket a bemenetekről, adatcsomagba rendezi őket és továbbítja a soros porton keresztül (ellenkező esetben a program visszalép a főciklusba és figyelmeztetésként égve hagyja a piros LED-et, hogy jelezze nekünk a zavart).

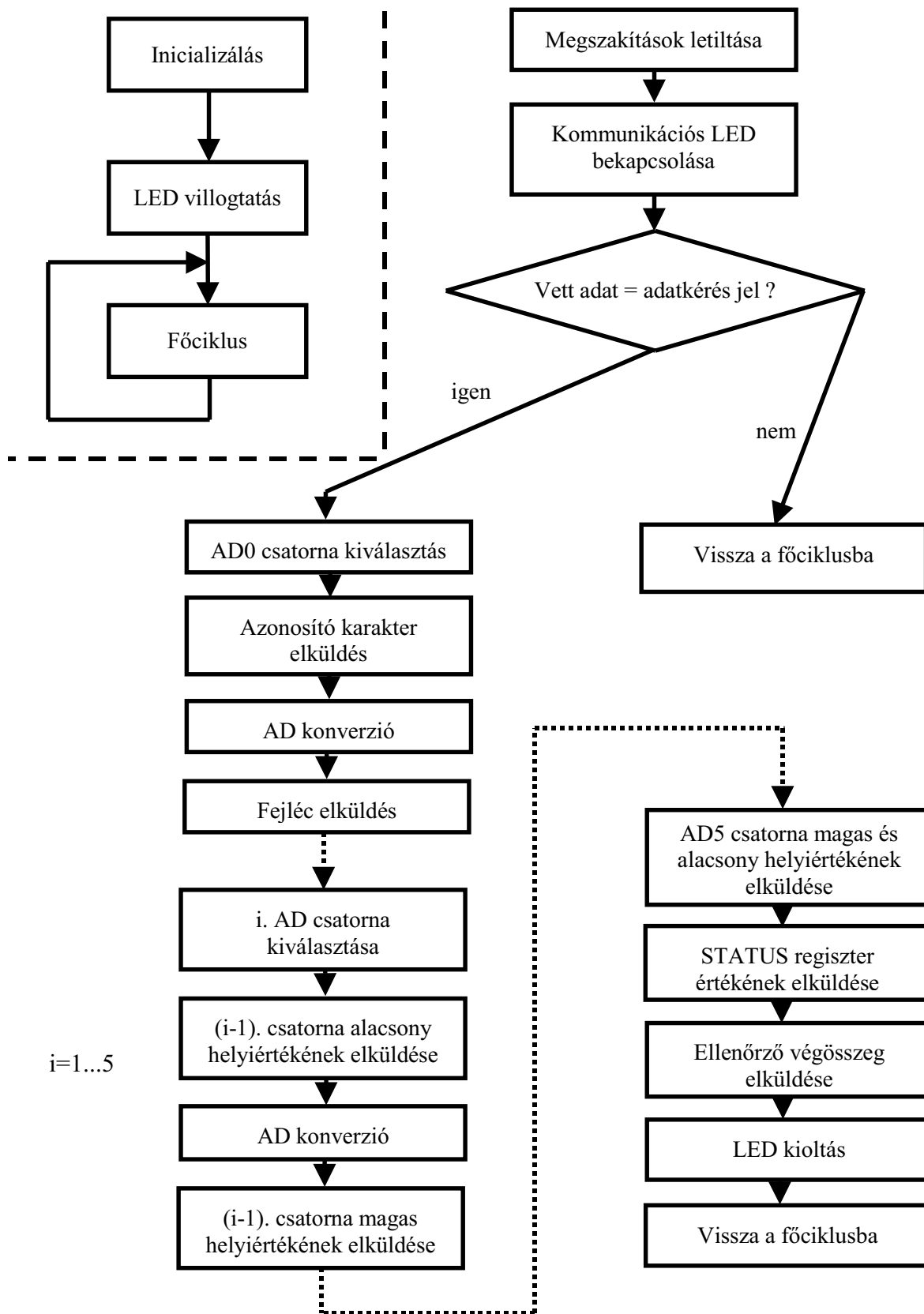
Az adatcsomag egy csomagazonosító jellel kezdődik (ez az adatkérelem jellel egyezik meg). A következő karakter a csomag hosszát tartalmazza (16 bájt). Ezután következnek sorban a mérési adatok. A könnyű tesztelhetőség érdekében utolsó előtti karakterként elküldöm a mikrokontroller állapotregiszterének tartalmát, majd utolsó karakterként egy ellenőrző végösszeget. Ha a karakterek értékét nyolc biten összeadjuk és hozzáadjuk az ellenőrző végösszeget, akkor helyes vétel esetén nullát kell kapjunk. Ellenkező esetben a vételben zavar történt és az adatfolyamban bithibák léptek fel. Ekkor a hibás adatcsomagot eldobjuk és újrakérjük a mérési adatokat. Ezzel a módszerrel el tudjuk kerülni, hogy hibás adatokat dolgozzunk fel.

Ügyeltem arra, hogy a megszakítás rutin minél hamarabb lefusson, ezért ahol csak lehetett, párhuzamosítottam a műveleteket. Például, amíg egy karaktert elküld a program a kommunikációs vonalon, ez idő alatt kiszámolja a program az ellenőrző összeg aktuális értékét, közben a mikrokontroller az éppen kiválasztott csatornáról tölti az A/D átalakító mintavevő és tartó kondenzátorát, vagy pedig éppen egy A/D átalakítást hajt végre.

Az adatok elküldése után a program kikapcsolja a piros LED-et és visszatér a főciklusba.

A program indulása és főciklusa:

A megszakítás függvénye:



5.6. ábra: A mikrokontroller vezérlőszoftverének folyamatábrája.

5.5.4. Az A/D átalakító beállítása

Az A/D átalakítót a megépítése után hamar működésre lehetett bírni, azonban gyorsan kitűnt, hogy az átalakító által közvetlenül kiadott adatok nem pontosak. A mikrokontroller leírása alapján kiderült, hogy a referenciafeszültség-generátorok gyári előállításánál viszonylag nagy a szórás. A generátor nagyon pontosan szolgáltatja a gyárilag beállított feszültséget, azonban a beállított feszültség a 4,096 V helyett 4,0 és 4,2 V között változhat [30]. Az A/D átalakító földpontjánál is fellelhető offszetfeszültség, ami szintén torzítja a mért értékeket. A referenciafeszültség eltérése erősítéshibát, az offszetfeszültség pedig nullhibát okoz a mérés során. A megépített készüléknél ezek a hibák 1 V mérésekor kb. 2%-os eredő hibát okoztak, ezért kompenzálni kellett őket. A kompenzációt az A/D átalakító adatait vevő szoftverben végeztem el, mivel itt a számok lebegőpontosan vannak ábrázolva, ezért a kompenzáció során nem lépnek fel kerekítési hibák, mint a mikrokontroller fixpontos aritmetikájánál.

A kompenzációt úgy végeztem el, hogy megmértem az A/D átalakítóval egy feszültségforrás kimenő feszültségét 10 különböző feszültség szintnél. Minden feszültség szinten kb. 7000 mérést végeztem és az átlagot vettem. (2 percig végeztem minden alkalommal a mérést, kb. 63 Hz-es mérőfrekvenciával. Innen a 7000-es szám.) A méréseknek az átlagát vettem, hogy a mérést terhelő zajok hatását lecsökkentssem. A zajok jelenléte és átlagolás hasznos, ugyanis a zajt dither-zajként tudjuk felhasználni, és ennek segítségével a mérés eredő feszültség szint felbontását le lehet vinni az A/D átalakító kvantálási lépcsőjének 1 mV-os szintje alá is. (Ezt a tulajdonságot a sugárzási szint méréseknél is kihasználtam később.)

A mérés során etalon műszernek egy 5 digitos HAMEG asztali feszültségmérőt használtam és a HAMEG műszer által mutatott értékekhez kalibráltam hozzá az A/D átalakítót. A 10 mérésre regressziós egyenest illesztettem és ennek adatai alapján határoztam meg a kompenzációhoz szükséges erősítés és offszet korrekciót.

Meghatároztam az A/D átalakító által szolgáltatott eredmények tápfeszültségtől való függését is. A feszültségfüggés nagyon kicsi, mindössze 0,075% / V.

A mérésről készült jegyzőkönyvek az E Függelékben találhatóak meg, a mérési adatok pedig a lemez mellékleten.

5.6. Az adatgyűjtő és motorvezérlő szoftver részletes ismertetése

A mérőrendszert régebben egy 286-os számítógépen működő szoftver vezérelte. Azonban a számítógéppel az utóbbi időben sok probléma volt, például kikapcsolás után elfelejtette a CMOS beállításokat; ezért le kellett cserélni egy korszerűbb gépre. Ekkor az operációs rendszert is lecserélték Windows 95-re. Az új környezetben viszont a régi vezérlőprogramot nem lehetett használni, mert folyton lefagyott. Éppen ezért egy új szoftvert készítettem. Az új szoftver sok, a mérés pontosságát javító elemet tartalmaz, ezenkívül olyan új elemeket, amelyek a kiértékelés és a dokumentálás munkáját segítik. A szoftver kihasználja a Windows lehetőségeit (a program ablakokkal dolgozik, a fontosabb funkciókat az eszköztárban levő gombokkal azonnal el lehet érni, részletes súgóval rendelkezik, könnyen lehet nyomtatni, stb.), ezért használata könnyű és kényelmes.

Mivel a szoftver objektum-orientált rendszerű, ezért a folyamatábrák itt viszonylag keveset mondanának el a működésről. Folyamatábrás ismertetésre azért sincsen szükség, mert a program részletes súgó alkalmazással rendelkezik, ahol tartalomjegyzék, címszavak, vagy általunk megadott kulcsszavak alapján egyaránt megkereshetjük az általunk megismerni kívánt részleteket. A program, a telepítéshez szükséges segédprogramok, a telepítési útmutató, a súgófájl és a forráskód mind megtalálható a lemez mellékleten. A következőkben a legfontosabb méréssel és kiértékeléssel kapcsolatos fogalmakról és újításokról lesz szó.

5.6.1. A projekt fogalma

A régebben használt DOS-os program mindössze egyetlen szöveges fájlt készített, amiben a mérési eredmények voltak. Az általam készített program viszont egy mérés lebonyolításához és kiértékeléséhez több fájlt is használ: motor- és mérésvezérlő fájlt, megjegyzéseket tartalmazó fájlt, a mérési eredményeket tartalmazó fájlt és a mérésről alapinformációkat tartalmazó fájlokat. Ezeken kívül mi magunk is létrehozhatunk még bitkép fájlokat és jegyzőkönyv fájlokat. Azért, hogy ezek a fájlok ne keveredjenek össze más mérési adatokkal, ezért minden mérés adatait külön könyvtárban kezeli a program. Egy ilyen könyvtár tartalma egy projekt. Egy projektet az egész mérést összefogó, "prj" kiterjesztésű projekt alapfájl segítségével lehet a programba betölteni.

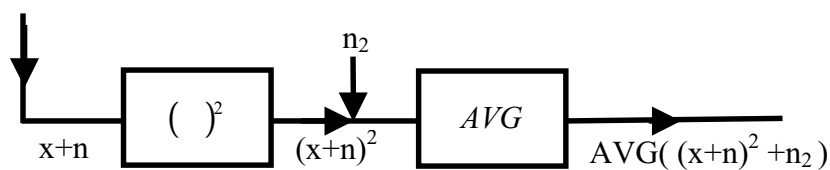
A projektek segítségével rendszerezetten lehet tárolni a méréseket. A mérések mellett rögtön el lehet olvasni a mérési jegyzőkönyvet és megjegyzéseket. Azonnal információkat lehet kérni a mérőfájl felépítésére vonatkozóan is (például, hogy milyen felbontással tapogattuk le a mobiltelefon sugárzási terét, mekkora területen vagy, hogy mekkora volt a háttérzaj értéke a mérés során). Ezek az adatok a későbbi visszakereséseknél és az írásos dokumentumok elkészítésénél rengeteg segítséget nyújtanak.

5.6.2. Alapbeállítások

A méréssel kapcsolatos adatok legnagyobb része az adott mérési projekthez tartozik. Ezeket az adatokat a projekt könyvtárban tárolom. Azonban léteznek olyan paraméterek, amelyek nem a projekthez, hanem a mérőberendezés alap beállításaihoz kapcsolódnak. Ezek a paraméterek mondják meg az A/D átalakító hibakompensáló paramétereinek értékét, azt, hogy az A/D átalakító a számítógépen hányas COM portra csatlakozik, valamint, hogy hogyan néz ki a motorok vezérlési sorrendje és fordulatszám-áttételük értéke. Ezeket a paramétereket legtöbbször nem kell bántani, azonban például egy újrakalibrálás vagy átépítés után lehet, hogy át kell írni őket. A mérőberendezés tulajdonságait rögzítő adatokat a program könyvtárában egy inicializációs fájlban tárolom. A fájl szöveges adatokat tartalmaz, így a programból a megfelelő opciók alól, de akár egy szövegszerkesztővel is bármikor könnyen át lehet írni azokat.

5.6.3. Zajszint beállítás

A zajszint beállítás segítségével növelhetjük méréseink pontosságát. A régebbi szoftverben a mérési pontosságot egyszerű átlagolással próbálták növelni, azonban ez a módszer önmagában nem elég, ugyanis egy strukturális hibát tartalmaz. A probléma megértéséhez nézzük meg a következő ábrát:



5.7. ábra: A régi mérési elrendezés egyszerűsített blokkvázlata.

Az ábrán a régebbi, csak átlagolást tartalmazó mérési elrendezés egyszerű vázlata látható. A bemenetre a mérendő RF térerősség kerül, amit most x -szel jelöltünk. A mérendő jel az n mérési zajjal terhelt. Jó feltételezés, ha a zajt additívnak, nulla középértékűnek és a bemenő jeltől függetlennek tekintjük.

Ahhoz, hogy a térerősségből a teljesítménnyel arányos értéket kapjunk, a jelet egy négyzetes karakterisztikán kell átvezetni (ezt hozza létre az egyenirányító diódák karakterisztikája). A négyzetes karakterisztika után az n_2 zaj adódik a jelhez, amit a grafit elvezetések zaja és a mérőerősítő okoz. Ezt a zajt is tekinthetjük additívnak, nulla középértékűnek és a többi jeltől függetlennek. Az így kapott keverék jelet fogom ezután átlagolni. Mi lesz ennek az átlagolásnak az eredménye? Erre ad választ a következő egyenlet:

$$\overline{(x + n)^2 + n_2} = \overline{x^2 + n^2 + 2xn + n_2} = \overline{x^2} + \overline{n^2} + \overline{2xn} + \overline{n_2} = \overline{x^2} + \overline{\sigma_n^2}, \quad (5.1.)$$

ahol felülvonással jelöltem az átlagolást és σ_n^2 -tel a bemeneti zaj varianciáját.

A zárójelek felbontásával és az átlagolás szétbontásával négy tagra szedhető szét az eredeti képlet: a bemenő mérendő jelből származó teljesítményértékre, a bemenő jelhez adódott zaj négyzetes momentumára, a bemenő jel és a bemenő zaj korrelációjának kétszeresére és a négyzetes karakterisztika után a jelhez adódott zaj átlagára. Mivel a bemenő jel és a bemenő zaj függetlenek egymástól, ezért korrelációjuk 0, tehát a harmadik tag kiesik. Az n_2 zaj átlagértéke szintén 0, tehát ez is kiejtődik az átlagolással. Azonban a bemeneti zaj négyzetes momentuma semmiképpen sem lesz nulla. Abban az esetben, ha a zaj középértéke 0, ez az érték a zaj varianciájával lesz egyenlő és ez az érték az átlagolással nem fog eltűnni. Ez a torzítás csak úgy tüntethető el, ha megbecsüljük a zaj varianciáját és ezt az értéket kivonjuk a mért értékből.

Az új programot úgy terveztem meg, hogy tartalmazza ezt a módosítást. A mérések előtt meg tudjuk mérni a háttérzaj okozta torzító hatást. Miután összeállítottunk egy mérési elrendezést, még nem kapcsoljuk be a mobiltelefont, hanem a zajszint kalibrálás opciót választva a programban, a program az ekkor mért értékek átlagolásával kiszámítja a háttérzaj varianciáját és a későbbiekben mért értékeket ezzel az értékkel fogja módosítani. Ezzel a módszerrel jelentősen csökkenthető a mérési hiba, mert a mérőrendszerben a zaj nagyobb része a mérőfej bemenetére indukálódott hálózati 50 Hz-ből és a bemeneten összegyűjtött RF háttérzajból áll.

5.6.4. Motorvezérlés

A motorok vezérlését a programban féllépéses vezérlési móddal oldottam meg, így ugyanis a motorok okozta rázkódás sokkal kisebb és a pozicionálás is pontosabb. A motorok mozgási sebessége a programból állítható, alapértelmezésben a motorok 1,25 cm/s sebességgel mozognak, mert ekkor a mérés viszonylag gyors, nem fordulhat elő a motoroknál lépéstévesztés, a motorok nem melegsznek és a működésük viszonylag halk (ezekről a tulajdonságokról részletesebben volt szó az 5.4.-es fejezetben).

A motorok mozgatásánál holtjáték kompenzációt is alkalmazok a minél nagyobb pozicionálási pontosság eléréséhez. A holtjáték kompenzációval meg lehet szüntetni azt a pozicionálási hibát ami akkor jelentkezik, amikor a motorral forgásirányt váltunk. Ilyenkor a motor által mozgatott elem nem indul el azonnal visszafelé, hanem előbb megereszkednek a gumiáttételek, majd újra megfeszülnek és a mozgás csak ezután következik be. Ekkor azonban már a motorra ráadtunk néhány léptetést és ezzel a léptetés számmal kevesebbet fog a motor visszafelé mozogni. Ezt a hibát úgy lehet kiküszöbölni, hogy ilyenkor az egyik forgásirány-váltás esetén a motor által mozgatott elemet kicsit továbbhúzzuk, mint a kijelölt végpont, majd megint forgásirányt váltunk és visszahúzzuk a kijelölt végpontba. Ekkor nem lesz holtjáték okozta különbség az oda- és visszamozgatás úthossza között. A programban a holtjáték-kompenzációhoz 1 mm-t húzom túl a mozgatandó elemet forgásirány váltáskor és 1 mm-t húzom vissza.

A motorok mozgatását a párhuzamos portról tudjuk elvégezni. A Windows környezetben sajnos nem lehet a párhuzamos portot közvetlenül, memóriacímekről elérni, viszont ezt a problémát sikerült megoldanom a TvicPort párhuzamos port meghajtószoftver segítségével, amely megtalálható a lemezmellékleten. A szoftver kiválóan működik Win95, Win98 és WinNT környezetben is.

A motorok mozgási útvonalát két módon is elő tudjuk írni a programban: közvetlenül a mérés megtervezésének dialógusablakában, vagy pedig előre elkészíthetünk egy motormozgási és mérési útvonalat a program segítségével. Az első esetben a motor mozgása kizárólag csak síkokon történhet, egy téglalap alakú területen. Egymás után több síkot is végigvizsgálhatunk ugyanazon a téglalap területen. Ez a mérési mód tökéletesen megfelel mobiltelefonok felületének sugárzás-vizsgálatához. Az ilyen rendszerben begyűjtött adatok könnyen tárolhatóak, megjeleníthetőek és kiértékelhetőek.

A második módszerrel részletesen megmondhatjuk, hogy a mérőfej milyen útvonalon mozogjon és melyik pontokban mérjen. Itt nincs megkötés a mozgási területre vagy irányra. Erre a módszerre akkor lehet szükség, ha fantomokban végzünk méréseket. Sajnos itt egy nagy hátrány, hogy a megjelenítés nem oldható meg általánosan, pont a szabad mérési útvonal miatt, úgyhogy ilyenkor a program nem tudja a kapott adatokat megjeleníteni, csak statisztikai feldolgozást tud végezni rajta és további feldolgozáshoz tudja a mért adatokat szöveges formátumra alakítani.

5.6.5. Mérés végrehajtás

A mérés végrehajtása sok apró, de nagyon hasznos újítást tartalmaz a régebbi kezelőprogramhoz képes, úgymint többszálú alkalmazások, folyamatos adatmentés és intelligens műszerkezelés.

A programban a mérés vezérlése és a kezelői felület külön szálon futnak, így a két funkció egymás mellett párhuzamosan tud működni. A mérés során a program kijelzi a méréssorozat jelenlegi állapotát százalékban, továbbá képes megbecsülni a mérés kezdő időpontja és az eddig eltelt idő alapján, hogy a mérés várhatóan mikor fejeződik be, ami nagy segítséget jelent a mérést vezető asszisztensnek. Ezt az értéket minden mozgásfázis után frissítve megjeleníti a program a képernyőn.

Ha a mérés során bármiféle probléma merül föl, a mérést meg lehet szakítani a mérés dialógusablakban levő nagyméretű STOP gomb megnyomásával. Ekkor még az utolsó mozgásfázis lefut és utána a program leállítja a mérést és megjeleníti az eddig mért eredményeket.

A program a méréssel kapcsolatos adatokat nemcsak a memóriában, hanem külön adatfájlokban is tárolja a nagyobb biztonságosság érdekében. A mérési eredményeket is folyamatosan rögzíti a gép merevlemezére. Így a mérés megszakadása esetén legalább az addig mért értékek el lesznek mentve és az adatfájlok alapján fel lehet azokat dolgozni.

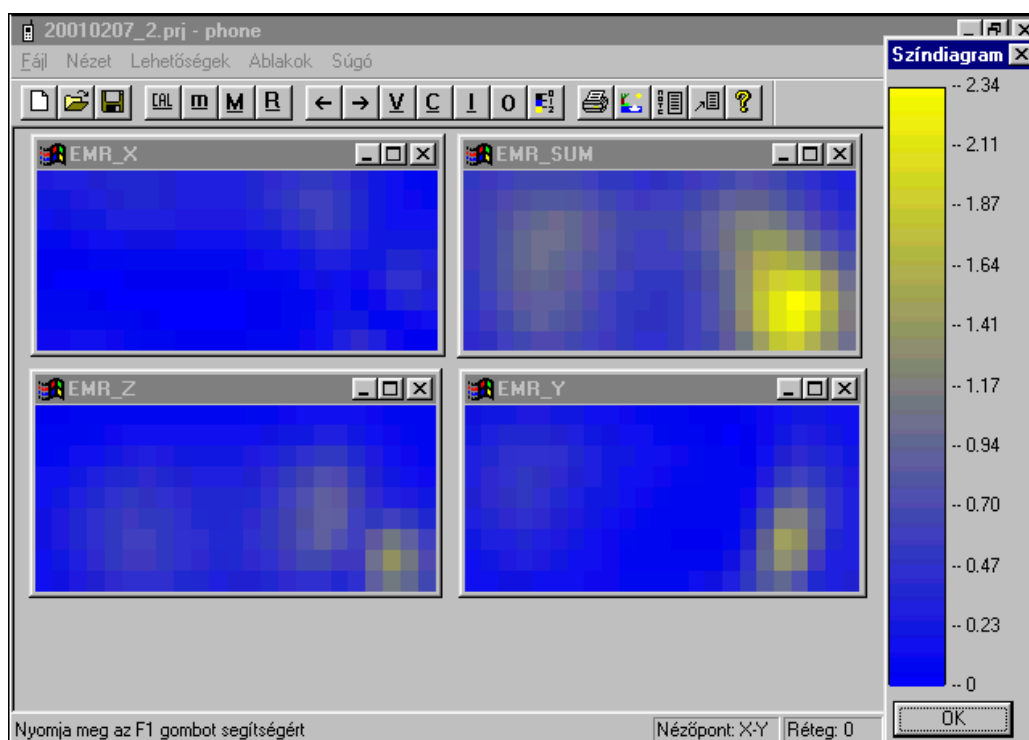
Mérés során a program "intelligens módon" kezeli az A/D átalakítót: az átalakító által küldött adatcsomagban levő ellenőrző végösszeggel folyamatosan figyeli a vett adatok helyességét és ha hibát észlel, a hibás adatcsomagot eldobja és újrakéri a mérést. A program az adatcsomag vételére való várakozás idejét is figyeli. Ha túlzottan sok idő telt el és még nem jött adatcsomag, akkor újra adatot kér a gép. Ha megint nem jött adat, akkor a gép még háromszor próbálkozik és csak ezután jelez nekünk hibát. Így

csomó mérgeződést meg lehet úszni, ami abból adódott volna, hogy például egyetlen adatkérelem jel elveszett egy elektromos zavarban, de egyébként semmilyen más hiba nem merült fel, viszont emiatt leállt a mérés.

5.6.6. Mérés kiértékelés

A régebben használt programban nem lehetett a mérést azonnal kiértékelni, azonban az új Windows környezetben lehetőség nyílt arra, hogy a mérés befejezésével azonnal grafikusan megtekinthessük a mért adatokat.

A program kezelői felületén négy átméretezhető ablak van, amiben láthatók az adott projekt mérési eredményei színdiagramok formájában (5.8. ábra).



5.8. ábra: Az elkészített program kezelői felülete.

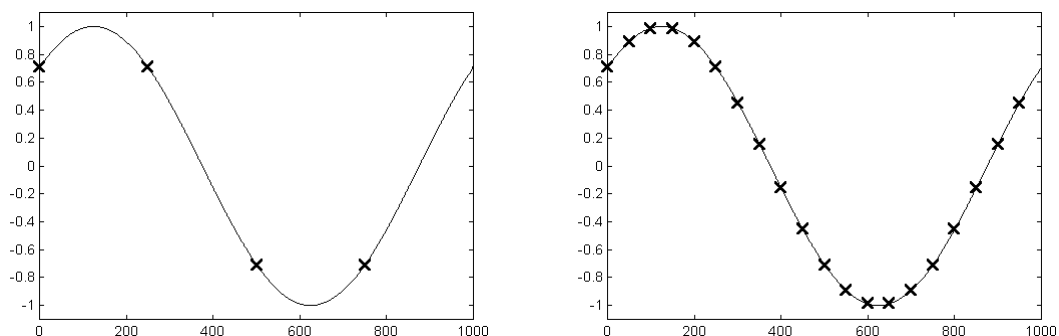
A programmal megtekinthetjük a mobiltelefonok feletti különböző rétegekben mért adatokat. Beállíthatjuk a megjelenítéshez használt színeket és szinttartományt, váltogathatunk a rétegek között, sőt, a rétegeket különböző nézőpontokból is megtekinthetjük. Ez a lehetőség sokat segít abban, hogy a mérési eredményekből összeálljon előttünk a mobiltelefon feletti háromdimenziós térbeljesítmény eloszlás képe. A jobb tájékozódás kedvéért, ha kérjük, a program egy piros négyzettel megjelöli a képen az Origo helyét.

A látott adatokat nem csak nézegethetjük, hanem ki is nyomtathatjuk vagy el is menthetjük bitkép formátumban. Mindkét esetben beállíthatjuk magunknak a kívánt nagyítást és a nyomtatás, illetve a bitkép paramétereit. Ha akarjuk, más programokkal való további feldolgozáshoz szöveges formába is konvertálhatjuk a mérési adatokat.

A programban lehetőség van még egy kezdetleges jegyzőkönyv elkészítésére is, amelyben a program feltünteti a mérés és a jegyzőkönyv készítésének időpontját, a mérési paramétereket (lemért terület méretei és a felbontások), az egyes rétegekben mért maximális térteljesítmény értékeket, és ezek pozícióját, valamint az egyes rétegekben mért összszugárzás értékét. A jegyzőkönyv a programban megtekinthető és szöveges fájlként elmenthető.

A méréssel kapcsolatos egyéb megjegyzéseinket egy külön fájlba tudjuk írni, a programba épített primitív szövegszerkesztővel.

A programhoz kiegészítésképpen még egy MATLAB környezetben használható függvényfájlt is készítettem, aminek segítségével szintvonalas formában is megtekinthetők a mérési adatok. Ezzel a függvényfájllal köbös interpoláció segítségével 5-ször nagyobb lineáris felbontással tekinthetők meg a mérési eredmények. Az interpoláció segítségével javíthatjuk is a mérés pontosságát: a mobiltelefon körül viszonylag lassan változik a térteljesítmény, azaz a térteljesítmény-változás csak kis frekvenciájú komponenseket tartalmaz. Éppen ezért ha 1 cm-es felbontással pásztázzuk végig a területet, akkor a mintavételi tétel betartásával tudjuk az adatokat rögzíteni. Azonban a kiértékeléskor a mintavételezett adatokból pontatlanul kaphatjuk meg a maximális térteljesítményt, mert a mintavételi tétel betartása még nem jelenti azt, hogy az adatokat analóg módon közvetlenül nagy pontossággal fel is tudjuk dolgozni. Nézzük meg a következő példát:



5.9. ábra: Példa arra, hogy a mintavételi tétel betartása még nem elég a mintavételezett jel analóg feldolgozásához.

A baloldalt látható szinuszjel egy periódusát mindössze négy helyen mintavételeztük. Ezzel ugyan betartottuk a mintavételi tételt, hiszen a mintavételi frekvencia most a duplája a szükséges minimális mintavételi frekvenciának, azonban az ábrából látható, hogy a minták közül a maximumértéket kiválasztva kb. 15%-os tévedést követünk el a szinuszjel amplitúdójának becslésére. A jobb oldalon köbös interpoláció segítségével a mintavételi frekvenciát 5-szörösre emeltük. Hibák persze itt is vannak, mivel az interpolációval nem pontosan az eredeti szinuszjelet állítottuk elő, ezenkívül itt sem találtuk el a szinuszjel csúcsertékét, viszont a pontatlanságot az eredeti 15%-ról 1-2%-ra le tudtuk csökkenteni.

5.7. Ellenőrző mérések

Az 5.5.-ös fejezetben már volt róla szó, hogy méréseket végeztem az A/D átalakító pontosságára vonatkozóan és ezekből a mérésekből jól látható volt, hogy az A/D átalakító feszültségstabilitása rendkívül jó és az offset- és erősítéshiba is jól kompenzálható. A mérőrendszerben ezenkívül még megvizsgáltam a mérőfej RF teljesítmény / feszültség karakterisztikáját, a mérési háttérzaj tulajdonságait és a mérőfej pozicionálás pontosságát. A részletes jegyzőkönyvek az E Függelékben olvashatók, a hozzájuk tartozó mérési adatok pedig a lemezmellékleten találhatóak meg.

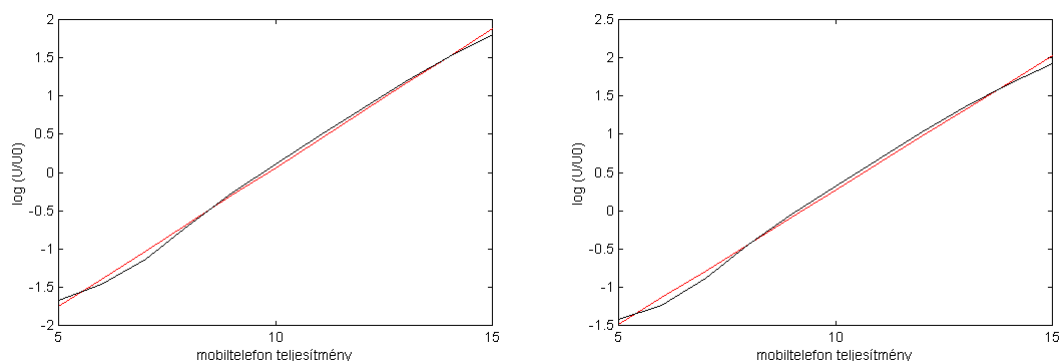
5.7.1. A mérőfej RF teljesítmény / feszültség karakterisztikájának vizsgálata

A mérőfej karakterisztikáját a mobiltelefonokon beállítható teljesítményszintek segítségével vizsgáltam meg. A telefonokon kb. 3 dB-es lépésekkel szabályozni lehet a kimeneti teljesítményt. A NOKIA készülékek például 11 különböző teljesítményszinten képesek sugározni. Ha lerögzítem az antennát a mobiltelefon fölé adott távolságra és pontosan be tudom állítani a teljesítményt, akkor megnézhetem a beállított teljesítményszinteknél a karakterisztika értékét.

A dolog a valóságban sajnos nem ennyire egyszerű, ugyanis a mobiltelefonok kimeneti teljesítményét nem szokták pontosan beállítani, úgyhogy a telefonok által a valóságban létrehozott teljesítmények eltérnek az adatlapokban leírtaktól. Azonban még ebben az esetben is tudunk a mérőfej teljesítmény/feszültség karakterisztikájának linearitásáról információt szerezni, ha kétszer végzem el a különböző teljesítményszinteken való méréseket, de a második esetben távolabbra teszem a

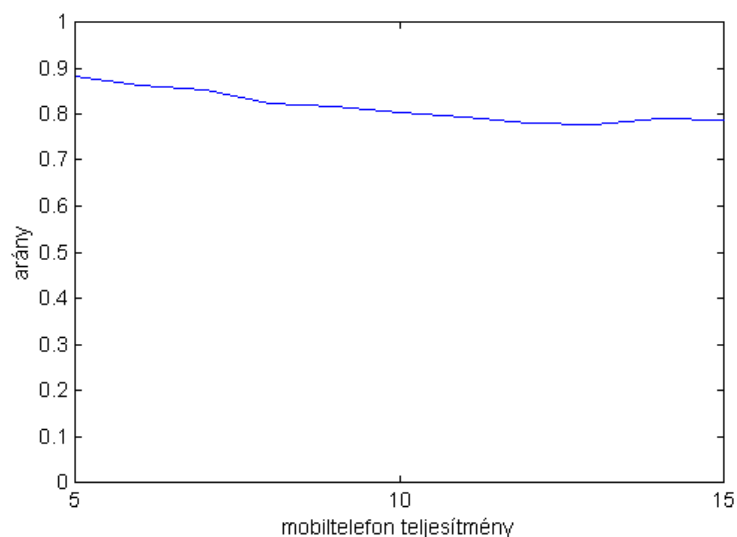
mérőfejet a mobiltelefontól. Ebben az esetben, ha a mérőfej karakterisztikája lineáris, akkor minden pontban az előzőleg mért ponthoz képest egy arányosan kisebb teljesítményt kell mérjek (hiszen az antenna távolsága a méréssorozat során nem változik). Ha most megnézem a két mérésből az azonos teljesítményszinteknél mért értékek hányadosát, akkor ezt az arányossági tényezőt kell megkapjam és ennek minden teljesítményszintnél ugyanannak kell lennie. Ha nem így van, akkor ez a mérőfej ideális karakterisztikától való eltérésére utal. Ilyen módon az eredeti mérési problémát egy aránymérésre tudtuk visszavezetni és ennek segítségével a mérési bizonytalanságot meg tudtuk szüntetni.

Az 5.10. ábrán láthatjuk egy NOKIA 2110-es telefon segítségével két különböző antennatávolsággal készült mérési eredményeket. Az Y tengelyen a mért feszültségek logaritmusai vannak feltüntetve, mert az X tengelyen a telefon teljesítményszintek szintén logaritmusos skálán értendők és így kellene ideális karakterisztikaként egyenes vonalat kapnunk. Az ábrán halványabb vonallal a mérési eredményekre négyzetes értelemben legjobban illeszkedő egyenes is be van rajzolva, hogy jobban lássuk az egyenes karakterisztikától való eltérést.



5.10. ábra: NOKIA 2110-es telefonnal mért mérőfej karakterisztikák.

Az 5.11. ábrán a két mérési eredmény hányadosa látható. Az ábrából jól látszik, hogy a vonal nem teljesen egyenes, kb 10%-os eltérés van a középérték körül. Ez a mérőfej enyhe nemlinearitására utal.

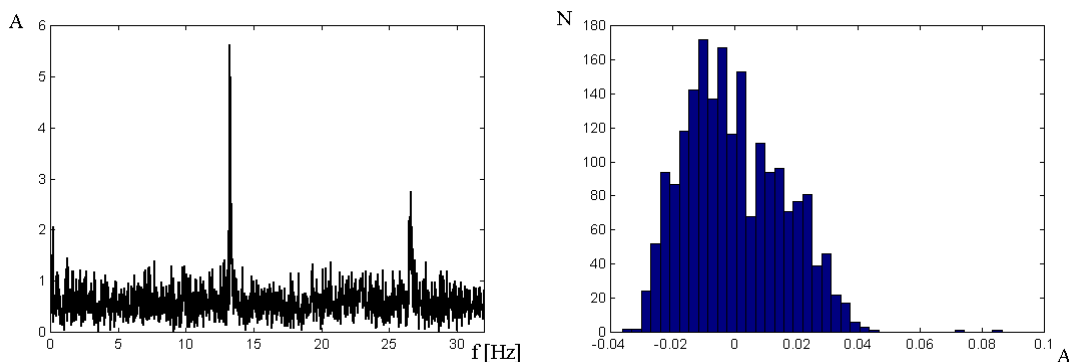


5.11. ábra: A NOKIA 2110-es telefonnal mért előbbi két karakterisztika hányadosa.

5.7.2. A mérési háttérzaj tulajdonságai

Ahhoz, hogy meg tudjuk állapítani, hogy körülbelül mennyi ideig érdemes átlagolást végezni egy mérési pontban, ahhoz ismerni kell a mérést zavaró zaj tulajdonságait.

Az összeállított rendszerrel elkészítettem egy mérési projektet, amelyben a mérőantenna mozgatása nélkül 2000-szer mértem meg egymás után a teljesítményt. Az egyes mérésekben csak egy mintavétel történt, azaz átlagolást nem használtam. A mérőfej szabadon volt a levegőben, mobiltelefont nem raktam a mérőrendszer plexi tartójába. A mérési eredményt szöveges fájlba konvertáltam, hogy MATLAB segítségével fel tudjam dolgozni. A kapott mérésekből megvizsgáltam a zaj spektrumát, korrelációfüggvényét és eloszlásfüggvényét. A mérési eredmények elkészítéséhez az egyenáramú komponenszt eltávolítottam a zajból, ez ugyanis nem tartozott a zajhoz. A mérési eredményekből készült spektrum és hisztogram az 5.12. ábrán látható.



5.12. ábra: A háttérzaj spektruma (bal oldal) és hisztogramja (jobb oldal).

A spektrumból jól látható, hogy a zaj két részre bontható: egy fehérzaj komponensre és a hálózati 50 Hz-re és első felharmonikusára. A két zajtípus körülbelül azonos tényezővel szerepel a jel mellett. Az A/D átalakító mindössze 63 Hz-es mintavételi frekvenciája miatt az 50 Hz-es komponens 13 Hz-re lapolódott be, a 100 Hz-es komponens pedig 27 Hz-re.

A hálózati feszültségkomponenseket érdemes lenne kiszűrni a nagyobb mérési pontosság érdekében. Ezt sajnos digitális szűrővel nehézkesen lehet megtenni, mert a frekvencia belapolódás miatt a szűrnek már 13 Hz-en erőteljes elnyomással kellene rendelkeznie. Ekkor viszont a szűrőnek lassú lenne a beállási tranziense és ez lassítaná a mérést. A szűrést inkább egy analóg szűrővel kellene megoldani a mérőerősítőben vagy a mérőerősítő után.

5.7.3. A mérőfej pozicionálás pontatlansága

Vizsgálatokat végeztem arra nézve is, hogy a motorok mozgatását milyen pontossággal lehet elvégezni. Ehhez méréseket szimuláltam a rendszerrel és a mérések végén a mérőfejet visszaállítottam a kiindulási pontba. A holtjáték kompenzáció alkalmazásával és ahol szükséges volt, ott tartóerő alkalmazásával a motorokat olyan pontosan lehetett vezérelni, hogy mérőpálcával nem sikerült eltérést kimutatni, tehát a mozgatási hiba jóval 1 mm alatt volt.

Sokkal nagyobb pontatlanságot okozott az a probléma, hogy a mobiltelefont a műanyag tartóba nem lehetett milliméter pontossággal mindig ugyanúgy betenni. Az X-Y irányban ez nem okozott gondot, ugyanis, ha a mobiltelefonon kijelölünk magunknak két viszonyítási pontot (például a készülék hallgatójának a bal alsó lukját és a beszélő bal alsó lukját), és mindig ezekhez beigazítottuk a készüléket, akkor X-Y irányban úgy ahogy tartani lehet a pontosságot mind a síkban történő eltolódásra nézve, mind a síkban történő elfordulásra nézve. A nagyobb gondot az okozta, hogy a mobiltelefon a tartóban függőleges irányban is képes volt elfordulni és ezt az elfordulási szöget nem lehetett kézben tartani. Ha például bedugtam a töltőt a mobiltelefon aljába, már ettől elfordult a készülék 1-2 fokot és ezt az eltérést szabad szemmel már nem tudtam észrevenni. Az elfordulás okozta hiba viszont kimutatható volt összehasonlító mérésekkel.

Ezt a problémát csak úgy tudtam csökkenteni, hogy nem közvetlenül a mobiltelefon felszínénél végeztem a méréseket, hanem attól 1 cm-re, így ha elfordult

kicsit a készülék, és például megemelkedett az eleje, akkor az emelkedés okozta relatív távolságcsökkenés és az ez által okozott hiba ekkor kisebb volt.

6. Sugárzásmérések különböző mobiltelefon típusoknál

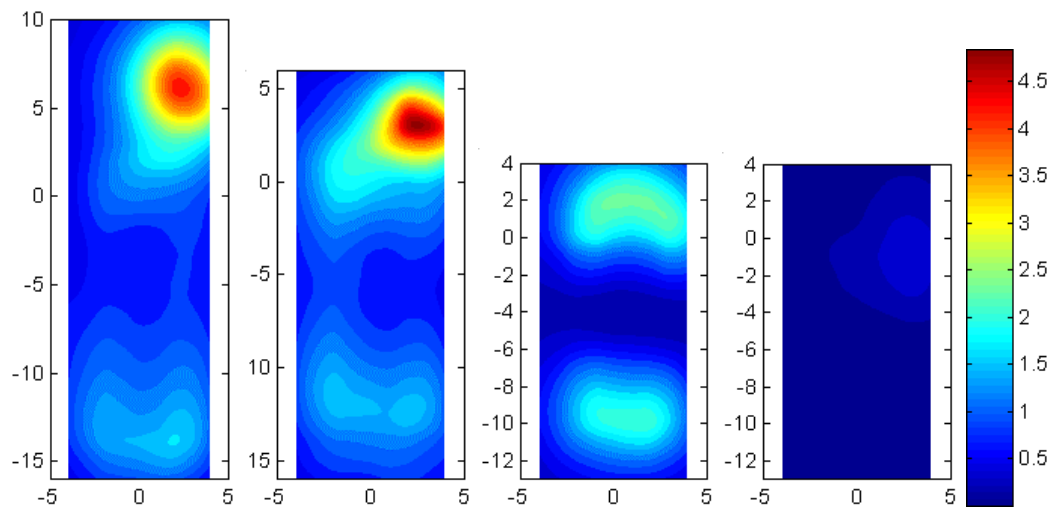
Az összeállított új mérőrendszer segítségével több mérést is elvégeztem mobiltelefonokon. A vizsgálatokhoz szükséges volt, hogy a telefonok teljesítményét ne egy bázisállomás szabályozza, hanem mi állíthassuk be az általunk kívánt konstans értékekre. Éppen ezért a vizsgálatok során NOKIA telefonokat használtam, mert ezekhez a telefonokhoz rendelkezésre álltak azok a vezérlőszoftverek, amelyek segítségével számítógépen keresztül mi állíthattuk be a telefonok teljesítményét a kívánt szintre.

A mérések során összehasonlítottam több különböző NOKIA mobiltelefon sugárzási terét és megvizsgáltam, hogy milyen különbségek vannak a 450 MHz-es, a 900 MHz-es és az 1800 MHz-es készülékek sugárzása között. Megvizsgáltam, hogy egy mobiltelefon "head-set"-je körül milyen sugárzási szintek jönnek létre. Megvizsgáltam három mobiltelefon sugárzás elleni védelem céljából árusított eszközt is, úgymint egy ZEROPA bogarkát, egy ZUCCARI Safety Butterfly-t és egy CEPO mobilpajzsot.

6.1. Mobiltelefonok összehasonlító mérése

Ebben a vizsgálat sorozatban három mobiltelefon sugárzási tulajdonságait hasonlítottam össze: egy Nokia NHE5-ös telefont, egy Nokia 2110-est és egy Nokia 3210-est. Az NHE5-ös telefon 450 MHz-en sugároz, a 2110-es 900 MHz-en, a 3210-es pedig kétnormás készülék: 900 MHz-en és 1800 MHz-en egyaránt képes működni. Mindegyik készüléknél lemértem a kezelői felület felé irányuló RF sugárzást. A 3210-es esetében mindkét frekvencián megmértem a sugárzási teljesítmény-eloszlást. A telefonokat bedugott töltővel mértem le, hogy a telefonok merülése ne okozzon mérési hibákat. Nokia 2110-es telefontól 250 mW átlagteljesítménynél, a Nokia 3210-es telefontól 900 MHz-en 250 mW átlagteljesítménynél, 1800 MHz-en pedig 125 mW átlagteljesítménynél végeztem a méréseket (ezek az értékek voltak a készülékek maximális teljesítményei). A Nokia NHE5-ös telefon analóg rendszerű. A maximális teljesítménye 1 W volt, de ehelyett a 150 mW-os középső teljesítményfokozatát használtuk, mert egyébként félő volt, hogy a nagy teljesítmény túlvezérli az A/D átalakítót és ezért nem tudjuk a maximális szinteket leolvasni.

A mérési eredményekről készült színdiagramok a 6.1. ábrán láthatóak, a 6.2. ábrán pedig a színdiagramokra arányhelyesen rámontíroztam a mobiltelefonok képeit, hogy a mobiltelefonokon mért térerősség eloszlás szemléletesebben látszódjon.



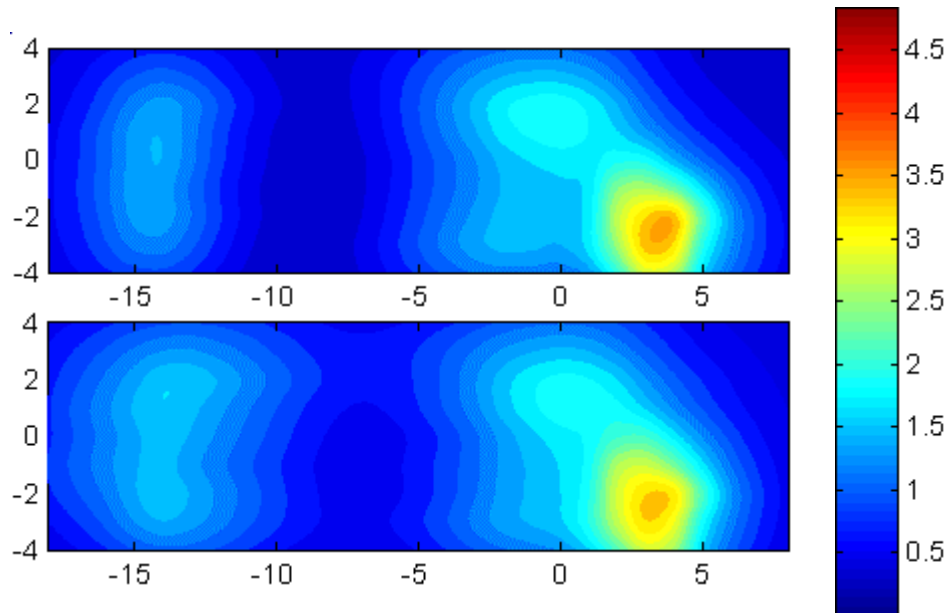
6.1. ábra: Mobiltelefonok által kibocsátott RF teljesítménysűrűség-eloszlás vizsgálata a telefon arc felé eső oldalán (a kezelői felületnél).
A telefonok balról jobbra: NHE5, 2110, 3210/900 MHz, 3210/1800 MHz.
(Az ábrán a színskála mértékegysége mW/cm^2 , a pozíciók cm-ben vannak megadva.)



6.2. ábra: Mobiltelefonok által kibocsátott RF teljesítményeloszlás.
A képekre a telefonok is arányhelyesen rá vannak montírozva.
A telefonok balról jobbra: NHE5, 2110, 3210/900 MHz, 3210/1800 MHz.

Az ábrákból jól látható, ahogyan azt várni is lehetett, hogy a legnagyobb térerősség az antennáknál lép fel. A 3210-es telefonnak a készülék dobozába beépített PIFA antennája van, ezért itt a telefon dobozában tetejénél látunk egy nagyobb sugárzó foltot. Azonban az is látható, hogy a mobiltelefonok többi része is, még a

mobiltelefonok alja is enyhén sugároz, sőt az alsó pont sugárzása erősebb a környezeténél. Először arra gyanakodtam, hogy a telefon aljába bedugott vezérlőkábel és töltő okozza a problémát, ezért összehasonlító kísérletet végeztem a 2110-es telefonnál, amikor töltőkábel és vezérlőkábel nélkül mérek és amikor mindkettő kábel be van dugva. Az eredmények a 6.3. ábrán láthatók.



6.3. ábra Nokia 2110-es telefon sugárzási képe vezérlőkábel és töltőkábel nélkül (felső kép), valamint kábelekkel együtt (alsó kép).
(A telefon a két képen most fekvő helyzetben látható.)
(Az ábrán a színskála mértékegysége mW/cm^2 , a pozíciók cm-ben vannak megadva.)

Mindkét esetben jól látható, hogy a telefon alsó része erősen sugároz. A két kép között ugyan látható némi eltérés és az alsó képen kicsit nagyobb a telefon aljának sugárzási szintje a felsőhöz képest, tehát a telefonba csatlakozó vezetékek is részt vesznek a jelenség kialakításában, de az alsó rész erősebb sugárzása vezetékek nélkül is előáll.

A 6.1. ábra további tanulmányozásából az is kitűnik, hogy a három telefon közül a leggyengébben a 3210-es készülék sugároz (pont az a készülék, amit "haláltelefonnak" becéznek a magyar és a német bulvárlapok). Az alacsony sugárzási maximum a PIFA antennának köszönhető, ami kismértékben irányított karakterisztikát állít elő és az RF sugárzás nagyobb részét a fejtől kifelé terjedő irányba sugározza. A PIFA antenna irányító hatása 1800 MHz-en már rendkívül erős. Ekkor a telefon felületén alig mérhető a sugárzás.

Megvizsgáltam azt is, hogy a mobiltelefonok felületén mért össz sugárzások (a teljesítmény-eloszlás képek integráljai) és a sugárzás maximumok hogyan alakulnak az egyes mobiltelefonoknál. Az eredmények a VI.1. táblázatban olvashatók.

VI.1. táblázat: mobiltelefonok összehasonlítása sugárzás maximumok és összes sugárzás szempontjából

telefon típus	sugárzás maximum [mW/cm ²]	összes sugárzás [mW]	megjegyzések
NHE5	4,236	256,07	150 mW, analóg, 450 MHz
2110	4,794	229,76	250 mW, digitális, 900 MHz
3210 / 900 MHz	2,38	141,39	250 mW, digitális, 900 MHz
3210 / 1800 MHz	0,493	16,16	125 mW, digitális 1,8 GHz

Annak ellenére, hogy az NHE5-ös telefont 150 mW-on mértük, a sugárzási maximuma majdnem eléri a 2110-es sugárzási maximumát, az össz sugárzása pedig nagyobb is mint a 2110-es össz sugárzása. Az is jól látható, hogy a 3210-es telefon fej felé irányuló sugárzási maximuma és össz sugárzása egyaránt jóval alatta van a 2110-esnél, 1800 MHz-en mérve pedig a fej felé irányuló sugárzás majdnem egy nagyságrenddel alacsonyabb mint a 2110-es telefontól, még akkor is, ha figyelembe vesszük az alacsonyabb készülék végteljesítményt.

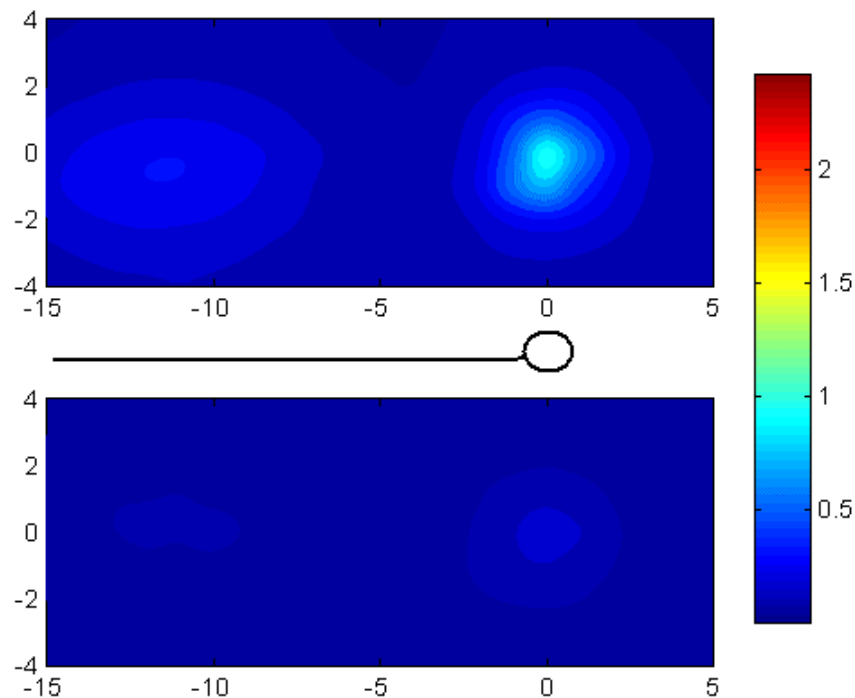
6.2. Mobiltelefon "head-set"-jén végzett mérések

Az utóbbi időben több cikk jelent meg arról, hogy a mobiltelefonokhoz kapható fülhallgatók képesek az rádiófrekvenciás teljesítmény jelentős részét összegyűjteni és továbbítani a fülbe, illetve az agyba [31]. Éppen ezért vizsgálatokat végeztem, hogy mekkora sugárzás alakul ki a fülhallgató fejének közelében.

A vizsgálathoz egy Nokia 2010-es készüléket és "head-set"-jét használtam. A fülhallgató egy Hungarocell tömbre lett felragasztva, hogy a mérés során ne mozduljon el. A felragasztás vékony ragasztószalaggal, a fülhallgató vezeték egyetlen pontján történt, hogy a ragasztás minél kevésbé módosítsa a mérendő értékeket. A fülhallgató dugója szabályosan be volt dugva a mobiltelefonba. A telefont a maximális teljesítményszintre, azaz 250 mW átlagteljesítményre állítottam.

Két mérést végeztem: az első esetben a legrosszabb esetet próbáltam szimulálni és ráhurkoltam a fülhallgató zsinórját a mobiltelefon antennájára. A második esetben a

zsinór az antenna közelében ment ugyan, de nem volt rajta hurok. A két mérési eredmény a 6.4. ábrán látható:



6.4. ábra: Mobiltelefon fülhallgatón végzett mérések.
A felső ábránál a fülhallgató zsinórja a telefon antennájára volt hurkolva, az alsó ábrán a zsinór hurok nélkül haladt.
A fülhallgató feje (ahogy a két diagram közti stilizált ábrán látható) jobb oldalon van és a zsinór balra jön ki belőle.
(Az ábrán a színskála mértékegysége mW/cm^2 , a pozíciók cm-ben vannak megadva.)

Az ábrákon látható, hogy a fülhallgató valóban össze tud szedni némi RF teljesítményt, de ez még abban az esetben is alacsony, ha a fülhallgató zsinórját az antennára hurkolom. Az antennára hurkolás esetén a maximális érték, amit mértem, $0,9557 \text{ mW}/\text{cm}^2$ volt, hurok nélkül pedig csak $0,2279 \text{ mW}/\text{cm}^2$. Ezek az értékek jóval kisebbek, mint amiket a mobiltelefonok felszínén mértem.

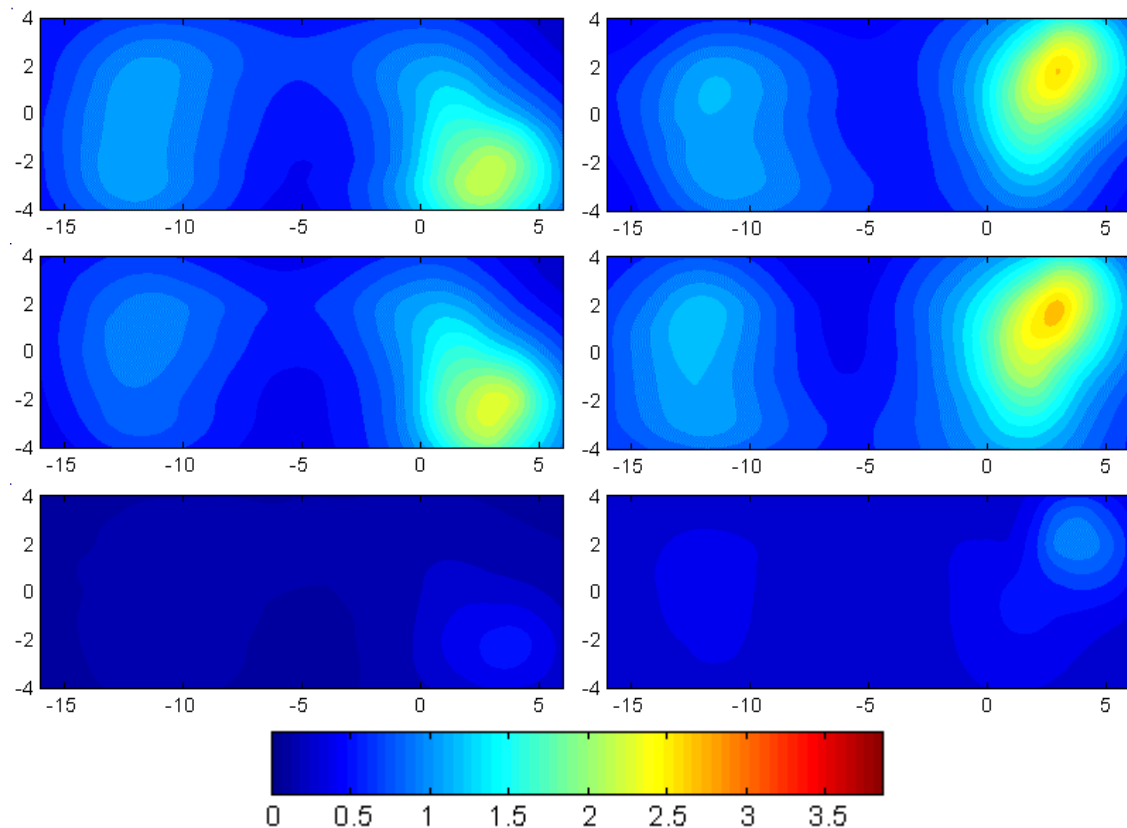
Az ábrán az is látszik, hogy a fülhallgató vezetékében állóhullámok alakultak ki és ezért nem csak a fülhallgató fej sugárzott, hanem attól kicsit távolabb a vezeték egy része is. Itt viszont már egészen kicsiny volt a sugárzási szint.

6.3. Sugárzás elleni védelem céljából árusított eszközök vizsgálata

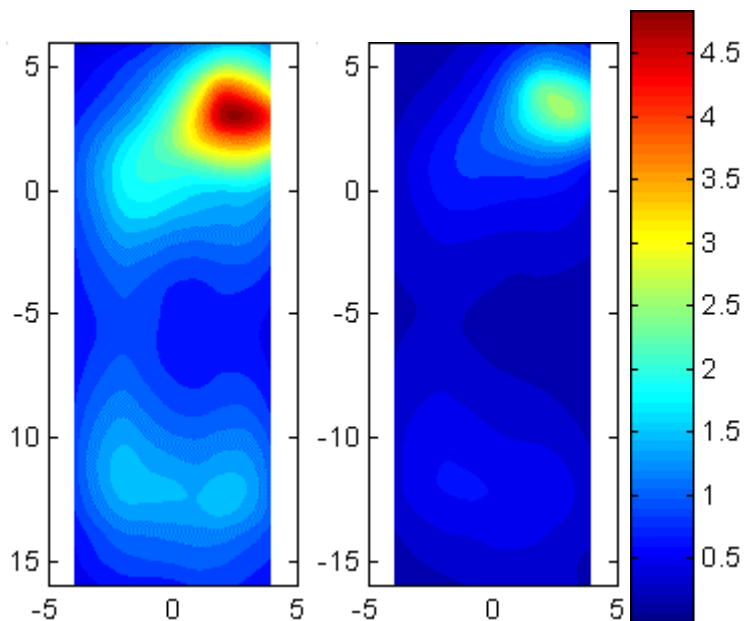
Három eszközt vizsgáltam meg, amelyeket arra árulnak, hogy a mobiltelefon sugárzás hatásait gyengítsék. Megvizsgáltam egy ZEROPA elektromágneses abszorbens bogárkát, egy ZUCCARI Safety Butterfly védőeszközt, és egy CEPO mobilpajzsot.

A mérésekhez egy Nokia 2110-es telefont használtam fel. A mérések során az egyes eszközöket úgy szereltem fel a telefonokra, ahogyan azt a használati útmutatóban leírták. A ZEROPA bogarat a telefon antennájának a tövébe ragasztottam fel. A lepkét az útmutató szerint bárhova fel lehetett ragasztani (még a készülék hátlapjára is). Én a készülék előlapjára, az antenna alá ragasztottam azt. A CEPO pajzsot az előírás szerint a készülék antennájával összeszereltem. A telefont a maximális 250 mW-os átlagteljesítménnyel üzemeltettem.

A mérések során összehasonlítottam a telefon előlapján és hátlapján mérhető térteljesítmény-eloszlásokat. Kivételt ez alól csak a ZEROPA bogárka jelentett. Ott csak az előlapot vizsgáltam meg, mivel ott a bogárka az antenna oldalán, a mobiltelefon síkjában volt, tehát logikus, hogy az előre és hátra irányokban egyaránt csökkenti a térerőt. A mérési eredmények a 6.5. és 6.6. ábrán láthatóak.



6.5. ábra: Mobiltelefon sugárvédelmi célból árusított eszközökön végzett mérések - 1. A felső ábrákon a Nokia 2110-es telefon védelmi eszköz nélkül mért sugárzási képe látható. A középső ábrákon a Safety Butterfly eszközzel mért sugárzási kép látható. Az alsó ábrákon a CEPO pajzs mérési eredménye szerepel. A bal oldalon a telefon arc felé eső részének sugárzása látható, a jobb oldalon a fejtől távolabb eső hátlap rész sugárzása.
(Az ábrán a színskála mértékegysége mW/cm^2 , a pozíciók cm-ben vannak megadva.)



6.6. ábra: Mobiltelefon sugárzásvédelmi célból árusított eszközökön végzett mérések - 2.
A bal oldalon a Nokia 2110-es telefon védelmi eszköz nélkül mért sugárzási képe látható.
A jobb oldalon a ZEROPA bogárkával mért eredmény szerepel.
(Az ábrán a színskála mértékegysége mW/cm^2 , a pozíciók cm-ben vannak megadva.)

Az össz sugárzás és maximális sugárzás adatok a VI.2. és VI.3. táblázatban olvashatók:

VI.2. táblázat: sugárzásvédelmi célból árult eszközök összehasonlítása
maximális sugárzás és össz sugárzás szempontjából - 1.

védelem típusa	összs. arc [mW]	összs. hátlap [mW]	max. s. arc [mW/cm^2]	max. s. hátlap [mW/cm^2]
nincs	190,9524	198,1127	2,2116	2,6625
Safety Butterfly	179,2507	215,1690	2,3417	2,7159
CEPO pajzs	39,1996	84,2768	0,5902	1,0490

VI.3. táblázat: sugárzásvédelmi célból árult eszközök összehasonlítása
maximális sugárzás és össz sugárzás szempontjából - 2.

védelem típusa	összs. arc [mW]	max. s. arc [mW/cm^2]
nincs	270,2337	4,7946
ZEROPA bogár	117,1411	2,5534

A képekből és a táblázatokból is látszik, hogy mindegyik sugárzásvédelmi eszköz csökkenti a telefon körül mérhető sugárzás mértékét. Ez azonban önmagában még nem elég, mert a mobiltelefon működési módja semlegesíti ezt a hatást: ha a bázisállomás érzékeli, hogy a mobiltelefon felé irányuló teljesítménye lecsökkent, azonnal parancsot

ad a készüléknek, hogy növelje meg végfokozatának kimenő teljesítményét és a felé irányuló térerőt a régi szintre állíttatja be. Ekkor tehát, ha nem vigyázunk, a fej felé irányuló térerősség ugyanakkora lehet, mint védelem nélkül, csak a mobiltelefon áramfelvételét növeltük meg feleslegesen.

Ezen megfontolások alapján a ZEROPA bogárka – az ajánlott felszerelési móddal – nem tekinthető hatásos védelemnek. Bár a telefon környékén mérhető térteljesítményt több mint 50%-kal csökkenti, mivel minden irányba egyenletesen csökken a térteljesítmény, ezért a valóságban a bázisállomás felszabályoztatna, tehát csak az akkumulátort merítjük gyorsabban le vele.

Ígéretesebbek azok az eszközök, amelyeket a mobiltelefon elejére lehet felragasztani, mert ezek nemcsak az antenna sugárzási szintjét, hanem az antenna iránykarakterisztikáját is befolyásolják. Ha a fej felé sokkal kevesebb sugárzás irányul az antennából, mint a fejtől ellentétes irányba, akkor a sugárzásvédelmi eszköz hatásos lehet.

A VI.2. táblázat alapján kiszámolhatjuk a védelem nélküli és a védelmi eszközök esetére az arc felé irányuló összsugárzás és a hátlap felé irányuló összsugárzás arányokat (a továbbiakban nevezzük előre-hátra aránynak). Minél nagyobb ez az arány, annál jobban csökken egy beszélgetés során a fejet ért sugárterhelés. Védelem nélküli esetben az előre-hátra arány 0,964, azaz gyakorlatilag azonos teljesítménnyel sugároz a készülék mindkét irányba. ZUCCARI Safety Butterfly esetén az előre-hátra arány 0,833, CEPO pajzs esetén 0,465. Ezek az eszközök tehát rendelkeznek valamilyen védelmi hatással. Azonban Safety Butterfly esetén a védelmi hatás elég gyenge (ráadásul a használati útmutatóban nem írták le rendesen, hogy hová ragasszuk fel az eszközt, így a védelmi hatás helyett akár ártó hatást is okozhatunk). CEPO pajzs esetén ugyan erősebb védelmi hatás érzékelhető, azonban az eszköz a sugárzási teljesítményt csaknem 60%-kal csökkenti. Emiatt normál működés során a bázisállomás felszabályozza a mobiltelefon végerősítőjét, ezért a telefon átlagos áramfelvétele sokkal nagyobb lesz.

Összefoglalásképpen elmondhatjuk a sugárzásvédelmi célból árusított eszközökről, hogy megfelelően felszerelve őket képesek a fej sugárterhelését csökkenteni, azonban a csökkenés értéke alacsony és cserébe megnövekedhet a készülék fogyasztása. Gondot okoz az is, hogy a védelmi hatás csak akkor érvényesül,

ha az eszközt megfelelő helyre szerelik fel, azonban a használati útmutatók sokszor nem adnak erről megfelelő tájékoztatást.

A sugárzásvédelmi célból árusított eszközök helyett jobb eredmények érhetők el, ha a mobiltelefon antennáját alakítják úgy ki, hogy a fejet kisebb sugárterhelés érje. Ebben az esetben az antenna paraméterei sokkal jobban kézben tarthatók, így megoldható egyszerre egy jobb karakterisztikájú antenna kialakítása és a készülék áramfogyasztásának alacsony szinten tartása. Ilyen megoldás például a Nokia 3210-es telefon PIFA rendszerű antennája.

7. Összefoglalás

Munkám során mobiltelefonok rádiófrekvenciás sugárzásának vizsgálatával foglalkoztam. Ismertettem a rádiófrekvenciás sugárzások általános hatásait, leírtam a mobiltelefon sugárzásokkal kapcsolatos vizsgálati eredményeket, valamint ismertettem a mobiltelefonok felépítését, sugárzási paramétereit és a sugárzásmérésekhez használt eszközök működésének alapelveit.

Részletesen ismertettem az Országos Sugáregészségügyi és Sugárbiológiai Kutató Intézetben levő, mobiltelefonok RF denzitometriai mérésére szolgáló eszköz felépítését és működését. Megmutattam, hogy hol voltak hiányosságok a mérőrendszer működtetése során és, hogy mely pontokon lehetett a rendszert továbbfejleszteni.

A mérőrendszer továbbfejlesztéséhez egy új vezérlőprogramot és egy új A/D átalakító hardvert terveztem. A készülék megtervezésénél és megépítésénél törekedtem az olcsóságra, a tesztelhetőségre tervezésre és az egyszerű eszközökkel elérhető minél nagyobb mérési pontosságra. Az elkészült A/D átalakító eszköz pontos és nagy megbízhatóságú. A nagy megbízhatóságot külön védelmi modulok segítségével és az eszközt kezelő programok "intelligens" működésével értem el. Az eszköz működését és tulajdonságait a Függelékek segítségével dokumentáltam.

Az új mérésvezérlő és adatgyűjtő program elkészítése során ügyeltem a minél könnyebb használatra, a biztonságos működésre és a mérés minél gyorsabb lebonyolíthatóságára. A programba számos adatfeldolgozást, rendszerezést és dokumentálást megkönnyítő részletet építettem be. Az így továbbfejlesztett rendszer segítségével pontosabb és gyorsabb méréseket lehetett végezni. A szoftver működését a forráskóddal, valamint a szoftverbe épített súgórendszer segítségével dokumentáltam.

A továbbfejlesztett rendszerrel méréseket is végeztem. Ezek során összehasonlítottam több mobiltelefon sugárzási paramétereit, megvizsgáltam, hogy milyen sugárterhelések léphetnek föl mobiltelefon "head-set" használata esetén és megvizsgáltam több mobiltelefonokhoz sugárzásvédelmi célból árusított eszköz hatásfokát. Megmutattam, hogy a "haláltelefonnak" becézett Nokia 3210-es telefon felé irányuló sugárzási szintje a PIFA antennaszerkezetnek köszönhetően lényegesen alacsonyabb, mint az egyéb, más antennaszerkezetű telefonoké. Bemutattam, hogy a mobiltelefonok fülhallgatóval történő használata esetén a fejet ért sugárterhelés jóval kisebb, mintha magát a készüléket tartanánk a fejünkhöz. Megmutattam azt is, hogy a sugárzásvédelmi eszközök jó része hatástalan, a működés rossz elméleti

megfontolásokon alapszik, vagy ha hatásosnak is bizonyul egy eszköz, a hatásfoka kicsi és számos nehezen megbecsülhető paraméter befolyásolja (például, hogy hova helyezik fel a védelmi eszközt); továbbá a védelemért cserébe megnövekedett áramfogyasztással kell fizetni.

Köszönetnyilvánítás

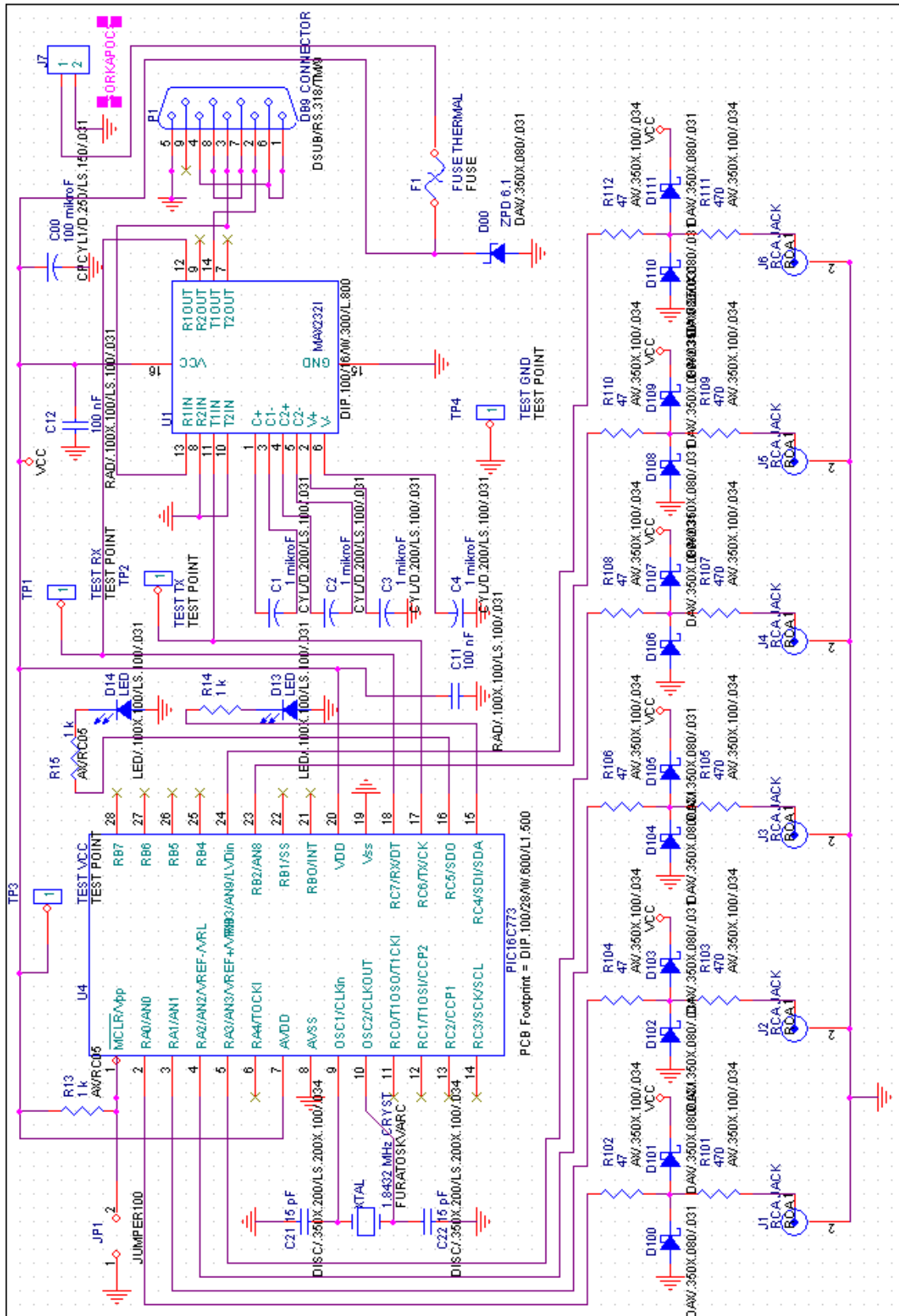
Köszönetet szeretnék mondani Pap Zsigmond és Héja Gergely doktorandusz hallgatóknak a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszékéről, akik értékes szakmai tanácsaikkal rengeteget segítettek nekem a diplomaterv készítése során az A/D átalakító hardverének elkészítésében és a szoftverek megírásában. Köszönetet szeretnék mondani továbbá az OSSKI dolgozóinak, akik mindig a segítségemre voltak, ha az RF mérőkészülékkel kapcsolatban bármilyen technikai nehézség lépett fel.

Irodalomjegyzék

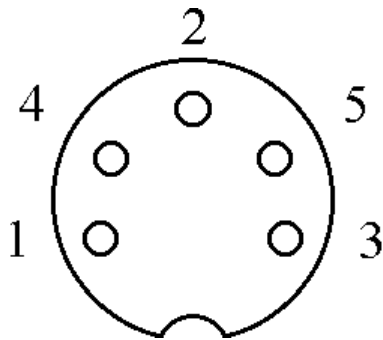
- [1] Dr. Thuróczy György, "A mobil hírközlés sugáregészségügyi kérdései", Magyar Távközlés - A Magyar Távközlési Rt. folyóirata, IX. évfolyam, 7. szám, 1998. július, pp. 26-33.
- [2] "Tények antennáról, mobiltelefonról", A Hírközlési és Tudományos Egyesület kiadása, Budapest, 1999. november
- [3] Paul de Kruif, "Akik életünkért harcoltak – Az emberiség 12 jótevője", második kiadás, Rózsavölgyi és társa kiadó, Budapest, 1942.
- [4] www.iegmp.org.uk
- [5] Charles Polk, Elliot Postow, "CRC Handbook of Biological Effects of Electromagnetic Fields", CRC Press Inc., Boca Raton, Florida, 1986.
- [6] Bawin S. M., Kaczmarek L. K. and Adey W. R., "Effects of modulated VHF fields on the central nervous system", Ann NY Acad Sci, 247, 74, (1975)
- [7] Arber S. L. and Lin J. C., "Microwave induced changes in nerve cells: effects of modulation and temperature", Bioelectromagnetics, 6, 257, (1984)
- [8] Lai H. and Singh N. P., "Acute low-intensity microwave exposure increases DNA single-strand breaks in rat brain cells", Bioelectromagnetics, 16, 207, (1995)
- [9] www.e-technik.uni-kl.de/mpcs/leitgeb/leitgeb.html
- [10] www.bfs.de/publika/themen/st9511/st9511.htm
- [11] Joachim Tisal, "GSM cellular radio telephony", Chicester [etc.] : Wiley, 1998
- [12] Michael A. Jensen and Yahya Rahmat-Samii, "EM Interaction of Handset Antennas and a Human in Personal Communications", Proceedings of the IEEE, vol. 83, No. 1, January 1995, pp. 5-17.
- [13] Borivoj Modlic, Antonio Sarolic, Vesna Roje, "GSM Base Stations Impact on Environmental Electromagnetic Pollution", 42nd International Symposium Electronics in Marine, Zadar, Croatia, June 28-30. 2000., pp. 22-27.
- [14] www.powerwatch.org.uk/micromob.html
- [15] H.-R. Chuang, "Human Operator Coupling Effects on Radiation Characteristics of a Portable Communication Dipole Antenna", IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol. 42, No 4, April 1994., pp. 556-560.
- [16] Kenneth R. Foster & John E. Moulder, "Are mobile phones safe?", IEEE Spectrum, The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2000. August pp. 23-28.
- [17] www.origo.hu/tudomany/elet/001222mobiltelefonok.html
- [18] Yu. G. Grigoriev and V. S. Stepanov, "The Influence of EMF on Brain (Some Experimental Results on Animals and the Investigation of EMF Mobile Telephone Conducted on Volunteers", 4th EBEA Congress, Zagreb, November, 19-21, 1998., pp. 69-70.
- [19] J. Ayoub, R. de Seze, C. Sebban and L. Miro, "Effects of Mobile Phones on EEG in Humans", 4th EBEA Congress, Zagreb, November, 19-21, 1998., p. 68.
- [20] Maila Hietanen, "Neurophysiological Studies During RF Exposure From Cellular Phones", 5th COST 244bis Workshop: "RF Exposure Assessment of Epidemiological Studies", Zagreb, Croatia, 1998., pp. 31-35.
- [21] www.mcw.edu/gcrc/cop/cell-phone-health-FAQ/toc.html
- [22] www.jxj.com/magsandj/ipc/1999_03/how_safe_are_mobile.html
- [23] www.feb.se
- [24] Francis A. Duck: Physical properties of Tissue, Academic Press, 1990, San Diego
- [25] Béla Szentpáli, Vo Van Tuyen and György Thuróczy "A Novel E-Field Probe for Measurements in Fantom", Proc. of 10th Microcoll, Budapest, March 21-24, 1999, pp. 453-456.
- [26] C. Grangeat, "Radio Frequency Radiation from Mobile Phones", Alcatel Telecommunications Review – 4th Quarter, 1998., pp. 298-304.
- [27] M. Miyakawa and S. Hoshina, "A New Gel Phantom Used for Three Dimensional Measurement of the Local SAR", IEEE MTT-S Digest 1996., pp. 1089-1092.
- [28] www.arrick.com
- [29] www.chipcad.hu

- [30] www.microchip.com
- [31] www.newscientist.com/nsplus/insight/phones/giveusaring.html
- [32] Jacques Thuéry, "Microwaves: Industrial, Scientific, and Medical Applications", Artech House, London, 1992.
- [33] Herrick J., "Pearl-chain formation", Proceedings of the 2nd annual Tri-Service conference on biological effects of microwave energy, Charlottesville, University Virginia, 1958. pp. 83-93.
- [34] Mátay Gábor - Zombory László, "A rádiófrekvenciás sugárzás élettani hatásai és orvosi biológiai alkalmazásai", egyetemi tankönyv, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2000.
- [35] Thuróczy Gy, "Az elektromágneses terek biológiai hatásai I.", Magyar Távközlés, VII. évf. 9.szám, 1996., pp.50-56,

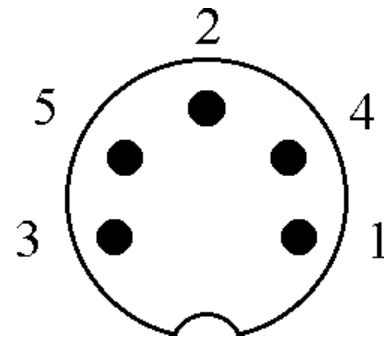
Függelék A: Az ADCONV-001 készülék részletes áramköri rajza



Függelék B: Az ADCONV-001 készülék tápfeszültség-csatlakozójának bekötési rajza



Számítógépbe illesztendő csatlakozódugó a bekötési (forrasztási) oldal felől nézve



Billentyűzetbe illesztendő csatlakozóhüvely a bekötési (forrasztási) oldal felől nézve

A számítógépbe illesztendő csatlakozódugó lábkiosztása:

1. órajel a billentyűzet felé
2. adatvonal
3. régi billentyűzeteknél RESET láb, az újakban nem használt
4. földelés
5. +5 V

A két csatlakozó összekötése: az azonos számú lábak vannak összekötve egymással.

Az A/D átalakító számára a tápfeszültség a számítógépbe illesztendő csatlakozódugóból van kivezetve egy kéteres vezeték segítségével. A vezeték piros ere az 5. lábra, a fekete ere a 4. lábra van csatlakoztatva. A vezeték végei ónozottak, nincs rajtuk csatlakozó, mivel az A/D átalakítón sorkapocs segítségével vannak rögzítve.

Függelék C: Kommunikáció az ADCONV-001 készülékkel

A kommunikáció soros porton keresztül, aszinkron módon történik.

Kommunikációs sebesség: 9600 baud/sec.

Karakterméret és formátum: 8 bit + 1 stop bit, nincs paritás.

Adatkérelem: Az **AAh** karakterrel.

Válasz adatcsomag hossza: 16 bájt

Adatcsomag felépítése:

bájt sorszám	bájt típusa	bájt tartalma
1.	csomag kezdet azonosító	AAh
2.	csomag méret	10h
3.	1. csatorna, alsó bájt	adatfüggő
4.	1. csatorna felső bájt	adatfüggő
5.	2. csatorna alsó bájt	adatfüggő
6.	2. csatorna felső bájt	adatfüggő
7.	3. csatorna alsó bájt	adatfüggő
8.	3. csatorna felső bájt	adatfüggő
9.	4. csatorna alsó bájt	adatfüggő
10.	4. csatorna felső bájt	adatfüggő
11.	5. csatorna alsó bájt	adatfüggő
12.	5. csatorna felső bájt	adatfüggő
13.	6. csatorna alsó bájt	adatfüggő
14.	6. csatorna felső bájt	adatfüggő
15.	állapotregiszter	adatfüggő
16.	ellenőrző végösszeg	adatfüggő

A kommunikáció két részből áll:

1. Adatkérelem a számítógép felől az A/D átalakító felé.
2. Mért adatok továbbítása az A/D átalakító felől a számítógép felé.

Az adatkérelem egyetlen bájt, az AAh karakter soros vonalon való elküldésével történik. Azért esett a választás erre a karakterre, mert ennek bináris kódja 10101010, azaz egy négyszögjel. Ezt a négyszögjelet nagyon kis valószínűséggel tudják előállítani elektromos zavarok, ezenkívül logikai analizátorral vagy oszcilloszkóppal figyelve a soros vonalat, ez a mintázat könnyen azonosítható. Ugyanezen okok miatt az adatcsomag is ezzel az azonosító karakterrel rendelkezik.

Az adatcsomag a mérési adatokon kívül a biztonságos adatátvitel és a könnyű tesztelhetőség miatt további segédadatokat is tartalmaz. A csomag elejének azonosításához a csomag egy AAh azonosító karakterrel és egy a csomaghosszat tartalmazó fejléc karakterrel kezdődik. Ezután továbbítódnak a digitalizált csatorna feszültségek. Először az alsó nyolc bitet megy át egy bájtban, majd a felső négy bit. A felső bájt négy legmagasabb értékű bitje mindig 0. A tesztelésekhez debug információként átadódik a mikrokontroller státuszregiszterének értéke, majd a bithibák okozta zavarok elkerülésére egy ellenőrző végösszeget (CSUM) kerül át. Ha nyolc bites aritmetikával összeadjuk az adatcsomag bájtjainak értékét, akkor a CSUM értékkel együtt hibamentes vétel esetén mindig 0-t kell kapjunk.

Függelék D: A mikrokontroller vezérlőszoftvere (ADPIC.ASM)

```
list p=16C773
include "p16C773.inc"
__CONFIG _CP_OFF&_WDT_OFF&_XT_OSC

CHECKSUM EQU 0x20

SENDDATA EQU 0xAA ; ADATKERELEM JEL : AAh (170 decimalis 10101010
binaris)
RXCOMP EQU 0x21

T_Count EQU 0x22

ORG 000h
GOTO START

ORG 004h

IT
GOTO RX_INTERRUPT ;IT rutin kezdocime

;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;
;minden interrupt letiltasa, periferia interrupt kivalasztasa
;
;
ORG 100h
START
CLRF INTCON
BSF INTCON,PEIE

CLRF STATUS ;memoria bank kivalasztas inicializalasa
MOVLW SENDDATA ;ezt a jelet kell kuldenie a
szamitogepnek, hogy adatot adjon a PIC
MOVWF RXCOMP

;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;
;periferia interruptok beallitasa
;
;
MOVLW 0x20 ;00100000 parallel port int disabled, AD int,
USART receive int, USART transmit int, Sync Serial Port int, CCP1 int,
Timer2 int, Timer1 int
BSF STATUS, RP0
MOVWF PIE1 ;08Ch regiszter (a PIR1-ben lesznek az
interrupt azonositok)
CLRF PIE2
BCF STATUS, RP0

;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;
;A/D bekapcsolas, orajel beallitas
;
;
MOVLW 0xC0 ;11000000 Right justified A/D format (?),
Internal VRH-AVss ref. pot., minden A/D bekapcsolva
BSF STATUS, RP0
MOVWF ADCON1
MOVLW 0x80 ;HIGHREF enable sajnos ez 5 mA-t fogyaszt,
de erdemes folyamatosan bekapcsolni a nagy sebesseghez es a pontos
mukodeshez
MOVWF REFCON
BCF STATUS, RP0
BSF ADCON0,ADON ;bit0 1 A/D bekapcs.
BCF ADCON0,ADCS1 ;bit7 0
BSF ADCON0,ADCS0 ;bit6 1 freq_ADosc=1/8 clockfreq

;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;
;portok beallitasa
```



```

BSF      STATUS, RP0
MOVF     ADRESL, 0
BCF      STATUS, RP0
BCF      STATUS, C
ADDWF    CHECKSUM, 1
CALL     PROC_SENDCHAR ;AN9 alacsony helyiérték elkuldese
MOVF     ADRESH, 0
BCF      STATUS, C
ADDWF    CHECKSUM, 1
CALL     PROC_SENDCHAR ;AN9 magas helyiérték elkuldese

MOVF     STATUS, 0      ;kellemes ertekek: 00011xxx
BCF      STATUS, C
ADDWF    CHECKSUM, 1
CALL     PROC_SENDCHAR

COMF     CHECKSUM, 1
BCF      STATUS, C
MOVLW    1
ADDWF    CHECKSUM, 1
MOVF     CHECKSUM, 0
CALL     PROC_SENDCHAR

BCF      PORTC, 5      ;kommunikacios LED kialszik (PORTB7)
RETFIE

;;;;;;;;;;;;;
;0.14 mp kesleltetes
;;;;;;;;;;;;;
PROC_TIMER014
    MOVLW    0x7B      ;01111011 1/16 postscale timer2 on 1/4
prescaler
    MOVWF    T2CON
    MOVLW    0xFF      ;0.14 s kesleltetes
    BSF      STATUS, RP0
    MOVWF    PR2
    BCF      STATUS, RP0
    BSF      T2CON, TMR2ON ; bit 2
    BCF      PIR1, TMR2IF ; torles
TMR2CYCLE
    BTFSS    PIR1, TMR2IF ;
    GOTO     TMR2CYCLE
    BCF      T2CON, TMR2ON ; timer2 kikapcsolasa, hogy ne fogyassza
az aramot
    RETURN

;;;;;;;;;;;;;
;Karakterkuldes es varakozas a TX regiszter kiurulesere
;;;;;;;;;;;;;
PROC_SENDCHAR
    MOVWF    TXREG
    MOVLW    10h      ; approx. 140 us delay
    MOVWF    T_Count
WAIT_T_C
    DEFSZ    T_Count, 1 ; 138.8 us kesleltetes, hogy ennyi
ido biztosan minden korulmeny kozott
    GOTO     WAIT_T_C ; rendelkezésre alljon a sampler kond.
tolteséhez
    BSF      STATUS, RP0
WAIT2SEND
    BTFSS    TXSTA, TRMT ;bit 1
    GOTO     WAIT2SEND
    BCF      STATUS, RP0
    RETURN

;;;;;;;;;;;;;
;Varakozas az A/D konverzio vegere
;;;;;;;;;;;;;
PROC_WAITFORAD

```

```

WAITFORAD
    BTFSC    ADCON0,GO ;A/D konv. veget ert?
    GOTO    WAITFORAD
    RETURN

;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;
;A/D adatkuldes
;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;
PROC_SENDDATA
    BSF      STATUS, RP0
    MOVF     ADRESL,0
    BCF      STATUS, RP0
    BCF      STATUS,C
    ADDWF    CHECKSUM,1
    CALL     PROC_SENDCHAR ;alacsony helyiérték elkuldese
    BSF      ADCON0,GO      ;A/D konv. megkezdese
    MOVF     ADRESH,0
    BCF      STATUS,C
    ADDWF    CHECKSUM,1
    CALL     PROC_SENDCHAR ;magas helyiérték elkuldese
    CALL     PROC_WAITFORAD ;erre nincs feltetlenu szukseg, biztos
veget      ert 1ms alatt
    RETURN

END

```

Függelék E: Mérési jegyzőkönyvek

E.1. Az ADCONV-001 mérőeszköz kalibrálása

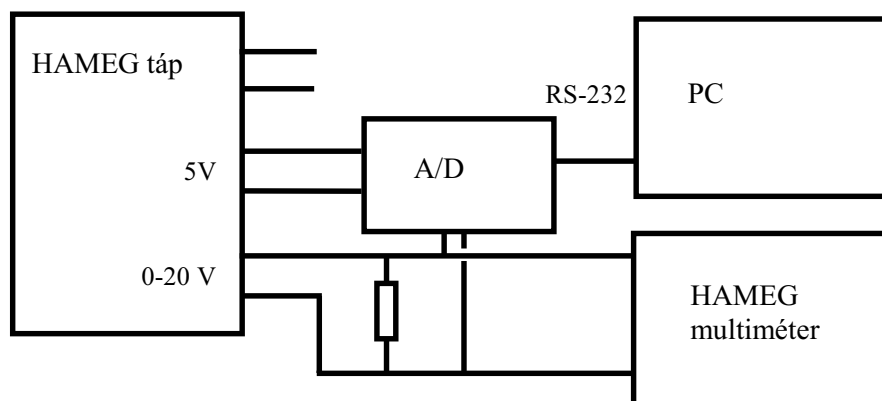
Felhasznált eszközök:

HAMEG HM-8040 hármastápegység

HAMEG HM-8011-3 multiméter

PC és a measure.exe program

A mérési elrendezés:



A hármastápegység 5V-os kimenetéről hajtottam meg a mérőeszközt. Az egyik állítható, földfüggetlen kimenetről szolgáltatott a mérendő feszültséget. A mérendő feszültséget a multiméterrel ellenőriztem. A tápegység kimenetére egy 100 Ohmos ellenállást kötöttem, mert egyébként a feszültség lassan ingadozott. Egy feszültség mérését 2 percig végeztem a measure.exe programmal, ami kb. 7000 mintát jelent.

A mért értékek:

HAMEG	ADCONV átlag	ADCONV szórás
15.915 mV / 0.2V mérés.	0.0063547 V	0.0011606 V
103.625 mV / 0.2V mérés.	0.0927053 V	0.0011551 V
0.25725 V / 2V mérés.	0.24355 V	0.0011050 V
0.5023 V / 2V mérés.	0.484828 V	0.0012102 V
0.75215 V / 2V mérés.	0.730207 V	0.0012095 V
1.0032 V / 2V mérés.	0.977076 V	0.0011828 V
1.25092 V / 2V mérés.	1.21902 V	0.0011813 V
1.50225 V / 2V mérés.	1.46614 V	0.0012087 V
1.74797 V / 2V mérés.	1.70766 V	0.0013170 V
1.98575 V / 2V mérés.	1.94169 V	0.0012364 V

A mért értékekre regressziós egyenest illesztettem a következő módon:

$$ADCONV = gain \cdot HAMEG + offset$$

A mérések kiértékelésével kapott értékek:

$$gain = 0,9822$$

$$offset = 0,0090 \text{ V}$$

A PHONE programban a következő módon korrigálok:

$$ADCONV' = gain' \cdot ADCONV + offset'$$

$$\text{Itt } gain' = \frac{1}{gain}, \text{ } offset' = -\frac{offset}{gain}.$$

E.2. Az ADCONV-001 mérőeszköz feszültségstabilitásának vizsgálata

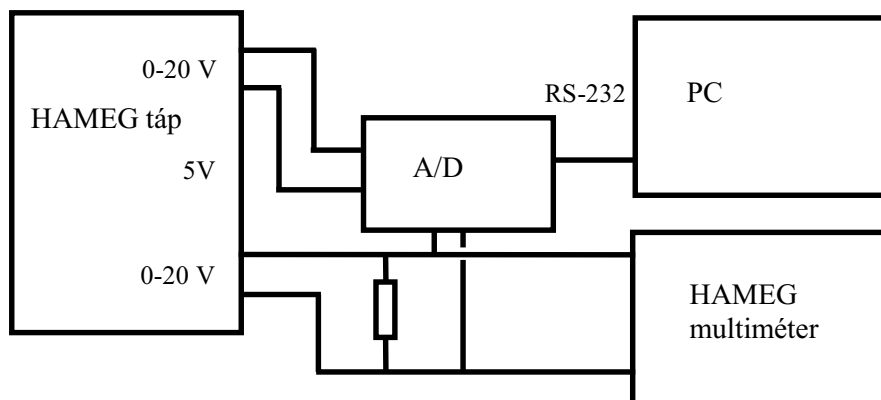
Felhasznált eszközök:

HAMEG HM-8040 hármas tápegység

HAMEG HM-8011-3 multiméter

PC és a measure.exe program

A mérési elrendezés:



A hármas tápegység egyik szabályozható kimenetéről adtam tápfeszültséget a műszernek. A másik szabályozható kimenetről kb. 1V-ot adtam a bemenetre. Erre a bemenetre párhuzamosan egy 100 Ohm-os ellenállást kötöttem, mert egyébként a feszültség nagyon ingadozott. A multiméterrel mértem a tápfeszültséget (20 V-os méréshatáron), az A/D átalakítóval mértem a kb. 1V-os feszültséget. Egy feszültség mérést 2 percig végeztem a measure.exe programmal, ami kb. 7000 mintát jelent.

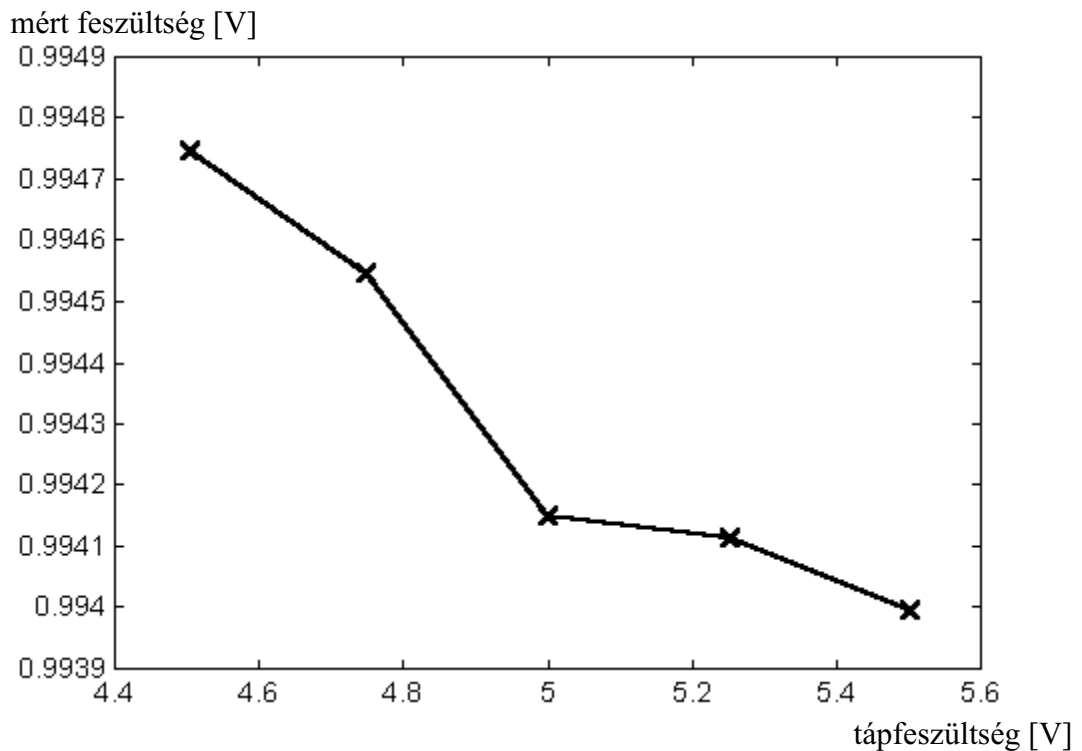
A mért értékek:

Tápfeszültség:	Mért feszültség:	Szórás:
5.0025 V	0.985453 V	0.0006342 V
4.504 V	0.986008 V	0.0006974 V
5.502 V	0.985301 V	0.0005582 V
5.253 V	0.985419 V	0.0006072 V
4.7502 V	0.985842 V	0.0006963 V

Megjegyzés: A mérés előtt az A/D átalakító a táskámban volt, ami az utcán kb. 5-10 °C-ra hűlhetett le. A méréseket a még hideg átalakítón kezdtem és a táblázatban feltüntetett sorrendben hajtottam végre. Csak jóval később, az eredmények

értékelésekor vettem észre, hogy az eredményeket kismértékben az is befolyásolta, ahogy az A/D átalakító a mérés közben szobahőmérsékletre melegedett fel.

Az eredmények kiértékelése:



Az ábrából látható, hogy a készülék által mért feszültség a tápfeszültség 1 V –os ingadozása esetén mindössze 0,075%-ot változik. Tehát az eszköz feszültségstabilitása rendkívül jó. A 4.75 V-nál és az 5.25 V-nál mért értékek kicsit "kilógnak". Ez azért történt, mert ezeket az értékeket jóval később mértem, mint a másik hármat és közben az eszköz néhány fokot felmelegedett. Ebből viszont az is kiderül, hogy a hőmérséklet stabilitás is jó, mert a néhány fokos változás körülbelül 0,001% változást okozott.

E.3. A mérőfej RF teljesítmény / feszültség karakterisztikájának vizsgálata

Felhasznált eszközök:

mobiltelefon sugárzásvizsgáló mérőrendszer, mérőfejjel

NOKIA 2010-es mobiltelefon

NOKIA 2110-es mobiltelefon

hordozható PC, rajta a mobiltelefon vezérlő szoftverekkel

Mérés menete:

Előbb a 2110-es mobiltelefonnal végeztem két kísérletet, majd a 2010-essel egyet. A mobiltelefont beraktam a tartószerkezetbe. Csatlakoztattam rá a vezérlőkábelt. A töltőt nem csatlakoztattam a 2110-esnél, mert túlzottan zavarta az 50 Hz-es sugárzásával a mérést, viszont érdekes módon a 2010-esnél nem, úgyhogy itt bedugva hagytam. (Az eltérések oka többféle lehet. Lehet, hogy a két esetben eltérően álltak a vezetékek, de az is lehet, hogy a két telefon belső felépítése eltér egymástól és ez okoz az egyik esetben a zavarást, a másik esetben pedig nem). Előbb felvettem a környezeti zajszintet, majd a vezérlőszoftverrel a legnagyobb sugárzási teljesítményszintről (5-ös szint) a legkisebb felé haladva (15-ös szint), 30 másodperces átlagolással rögzítettem a sugárzási szinteket. A 15-ös szint után ismét rögzítettem az 5-ös sugárzási szintet, hogy meg tudjam állapítani a mobiltelefon merülésének (vagy töltődésének) zavaró hatását. Ezután ismét rögzítettem a zajszintet, hogy meg tudjam állapítani a környezeti zajszint változásának zavaró hatását. Azért használtam csak 30 másodperces átlagolást, hogy a telefon merülése minél kevésbé zavarjon bele a mérésbe. A 2110-es telefonnal két mérést is végeztem, eltérő mérőfej távolsággal, hogy szét tudjam választani a mobiltelefon karakterisztika-hibáját és a mérőfej karakterisztika-hibáját. Az X, Y és Z irányú dipólok adatait külön rögzítettem.

A mérési eredmények:

NOKIA 2110 - 1

RF szint	X átlag [V]	Y átlag [V]	Z átlag [V]	X var. [V ²]	Y var. [V ²]	Z var. [V ²]
zaj	0.04591	0.04076	0.04396	0.00002	0.00003	0.00003
5	1.23932	3.27002	1.66922	0.00124	0.00598	0.00120
6	0.91717	2.49305	1.24277	0.00049	0.00378	0.00085
7	0.65971	1.85679	0.90634	0.00027	0.00208	0.00047
8	0.45832	1.34299	0.63582	0.00013	0.00111	0.00023
9	0.31928	0.96519	0.44646	0.00007	0.00056	0.00012

10	0.22787	0.69537	0.31603	0.00004	0.00031	0.00007
11	0.16480	0.49580	0.22543	0.00003	0.00016	0.00004
12	0.12138	0.34544	0.16100	0.00002	0.00009	0.00003
13	0.09211	0.23727	0.11658	0.00002	0.00006	0.00003
14	0.07789	0.18215	0.09516	0.00002	0.00004	0.00002
15	0.07174	0.15659	0.08505	0.00002	0.00004	0.00002
zaj	0.04388	0.03886	0.04201	0.00003	0.00004	0.00003

NOKIA 2110 - 2

RF szint	X átlag [V]	Y átlag [V]	Z átlag [V]	X var. [V ²]	Y var. [V ²]	Z var. [V ²]
zaj	0.03950	0.03355	0.03855	0.00003	0.00005	0.00004
5	1.08547	3.72034	2.17517	0.00080	0.00864	0.00273
6	0.81589	2.88602	1.66568	0.00047	0.00523	0.00160
7	0.58383	2.16708	1.23317	0.00024	0.00299	0.00088
8	0.41263	1.60811	0.89830	0.00013	0.00168	0.00048
9	0.28497	1.15800	0.63254	0.00007	0.00086	0.00025
10	0.20256	0.84335	0.45028	0.00005	0.00047	0.00014
11	0.14596	0.60340	0.31818	0.00004	0.00025	0.00008
12	0.10737	0.42435	0.22334	0.00003	0.00014	0.00005
13	0.08078	0.28817	0.15490	0.00003	0.00009	0.00004
14	0.06782	0.21441	0.11870	0.00003	0.00007	0.00004
15	0.06247	0.18316	0.10407	0.00003	0.00006	0.00004
5	1.07281	3.70911	2.15807	0.00079	0.00856	0.00264
zaj	0.03844	0.03328	0.03798	0.00003	0.00004	0.00003
base	0.03901	0.03594	0.03905	0.00003	0.00005	0.00003
zaj	0.03862	0.03298	0.03776	0.00003	0.00005	0.00004
base	0.03922	0.03591	0.03894	0.00003	0.00004	0.00003
test	0.03881	0.03308	0.03772	0.00003	0.00004	0.00003

NOKIA 2010

RF szint	X átlag [V]	Y átlag [V]	Z átlag [V]	X var. [V ²]	Y var. [V ²]	Z var. [V ²]
zaj	0.06296	0.05621	0.05667	0.00001	0.00002	0.00001
5	0.28317	3.56127	1.52853	0.00007	0.00780	0.00128
6	0.20735	2.68908	1.12913	0.00004	0.00448	0.00068
7	0.15711	2.01590	0.82675	0.00002	0.00243	0.00038
8	0.12198	1.48969	0.59386	0.00002	0.00133	0.00019
9	0.10021	1.09714	0.42709	0.00001	0.00071	0.00009
10	0.08603	0.80638	0.30981	0.00001	0.00037	0.00005
11	0.07662	0.58457	0.22573	0.00002	0.00020	0.00003
12	0.07047	0.42286	0.16858	0.00001	0.00011	0.00002
13	0.06636	0.30680	0.13008	0.00001	0.00006	0.00002
14	0.06421	0.22189	0.10358	0.00002	0.00004	0.00002
15	0.06241	0.16329	0.08573	0.00001	0.00003	0.00002
5	0.28329	3.59575	1.55363	0.00007	0.00791	0.00135
zaj	0.05936	0.05184	0.05425	0.00001	0.00002	0.00002

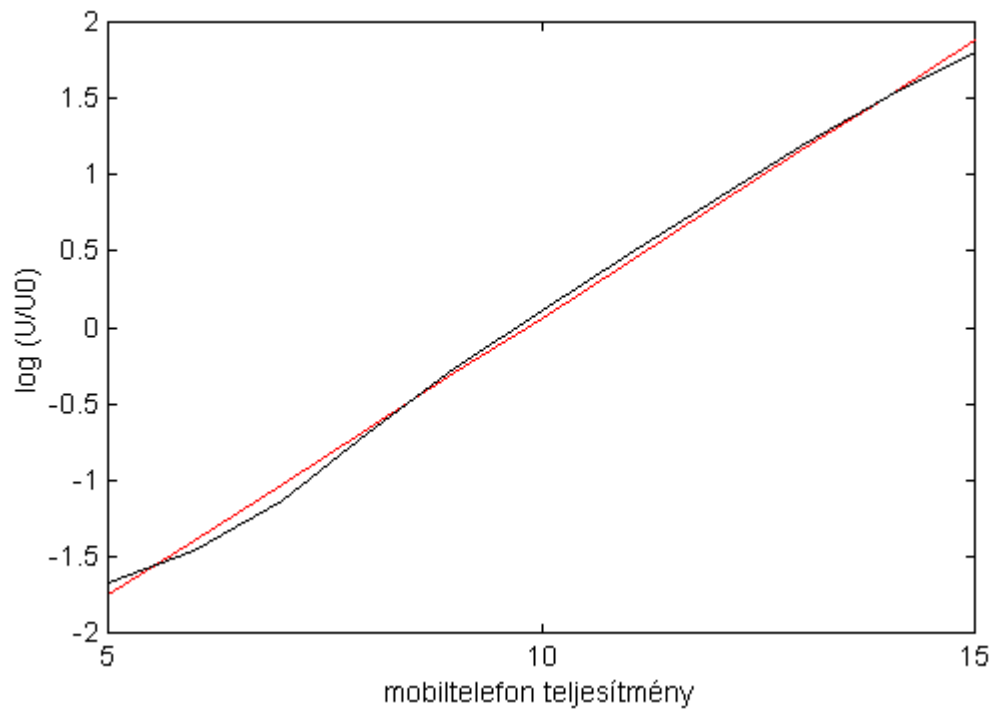
Az eredmények kiértékelése:

A következő három ábrán az egyes X, Y, Z mérések összegéből számított izotróp antenna karakterisztikáját láthatjuk a zajszinttel való korrigálások után. A korrekciót mindhárom esetben a 15-ös szint után mért zajszinttel végeztem el. A mérési eredményekből látható, hogy a zajszint nem állandó, a mérőerősítő bekapcsolása után csökken. Mindhárom esetben egy órát hagytam melegedni a bekapcsolt mérőerősítőt, de még ezek után is látható némi csökkenés a mérések során. Azért használtam a 15-ös zajszinthez közelebb eső zajszintet, mert feltehetően körülbelül ez a zajszint volt jelen a 15-ös és a többi kis teljesítményméréseknél is. A legnagyobb relatív hibát az ilyen kis teljesítményméréseknél okozza a zajszint, ezért itt a legfontosabb a legpontosabb zajszint becslő használata.

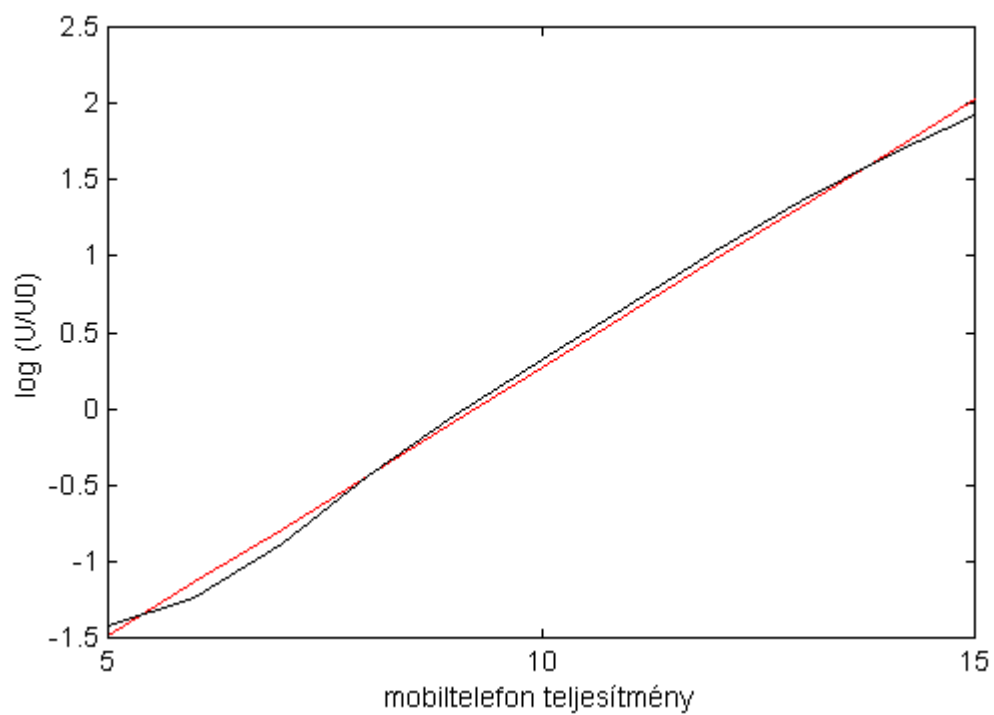
A második mérésnél méréseket végeztem a telefon BASE és TEST állapotában is. A TEST állapot a nem sugárzó állapotnak felel meg. Ekkor ki van kapcsolva az RF erősítő és az RF oszcillátor egyaránt. BASE állapotban egy enyhe térteljesítmény növekedést tudtam tapasztalni. Ebben az állapotban feltehetően be van kapcsolva az RF oszcillátor és csak a végfok van kikapcsolva.

Érdemes megjegyezni, hogy a BASE szint kimérésénél a térteljesítmény növekedést csak akkor lehetett megbízhatóan kimutatni, ha közvetlenül előtte mértem zajszintet, egyébként a hatás beleveszett volna a zajszint lassú változásába. Ha tehát ilyen alacsony szintű jeleket kell vizsgálni, akkor nemcsak az egész mérés előtt érdemes a zajszintet rögzíteni, hanem minden mérési pontban az adott RF teljesítmény meghatározása előtt is.

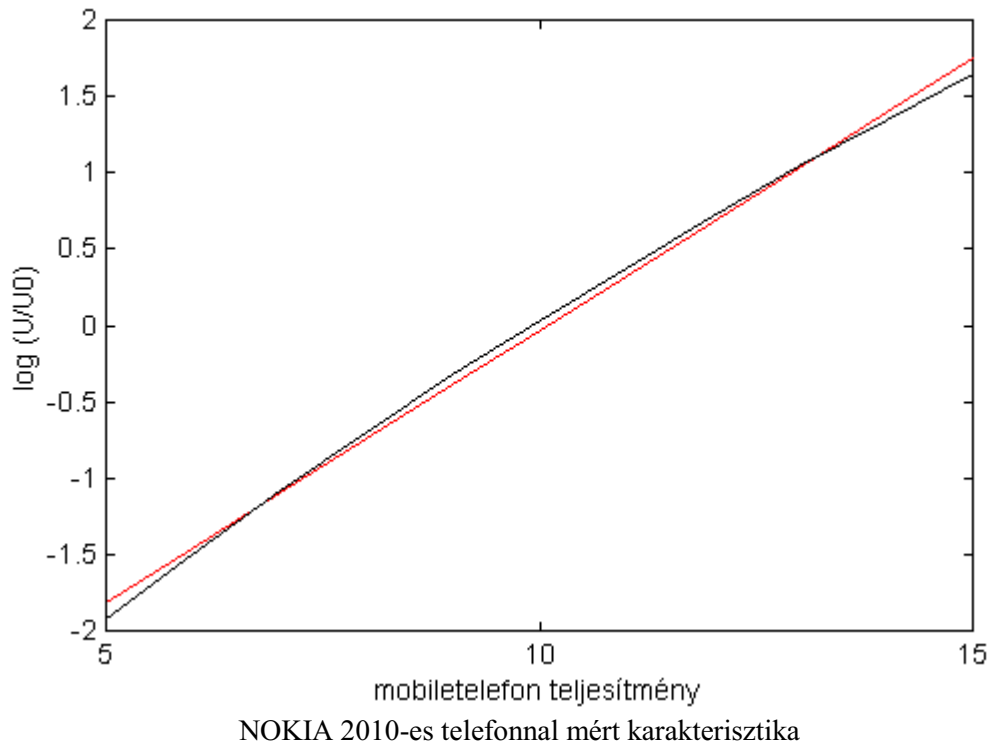
Az ábrákon a vízszintes tengelyen a mobiltelefon teljesítményszintje látható, a függőleges tengelyen pedig a teljesítménnyel arányos mért feszültség logaritmusa. Azért ábrázolom a logaritmus értékeket, mert a teljesítményszintek decibelben vannak megadva és így ábrázolva lesz a karakterisztika lineáris. A karakterisztikák mellett halványabb vonallal a karakterisztikákra négyzetes értelemben legjobban illeszkedő egyenest is feltüntettem.



NOKIA 2110-es telefonnal mért karakterisztika – 1

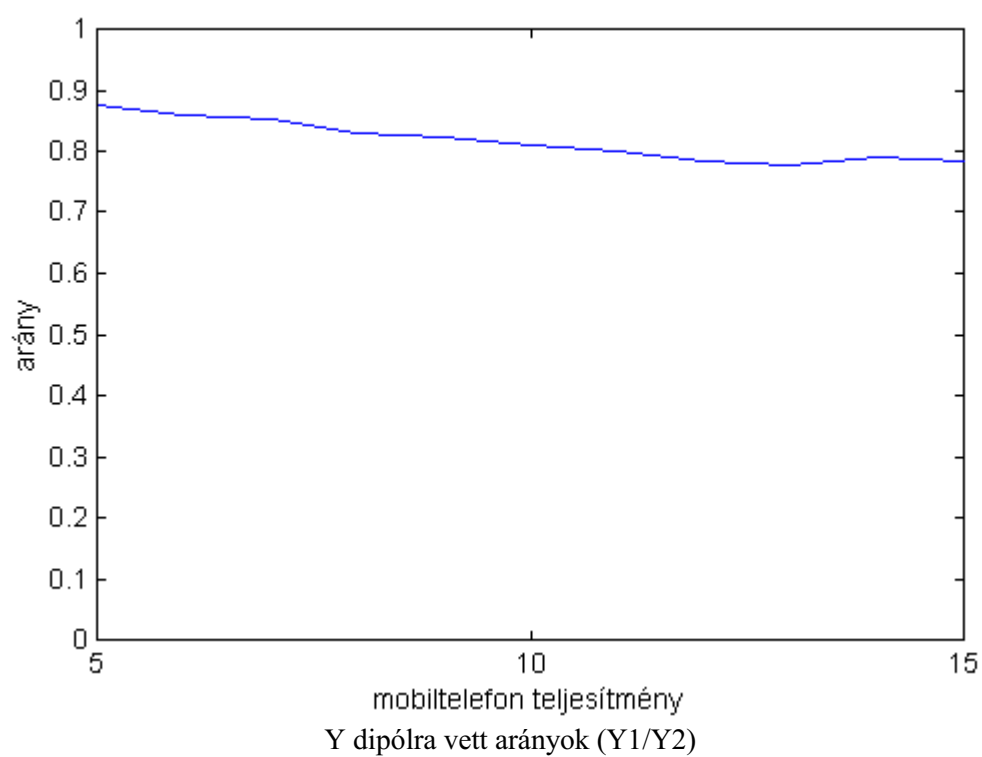
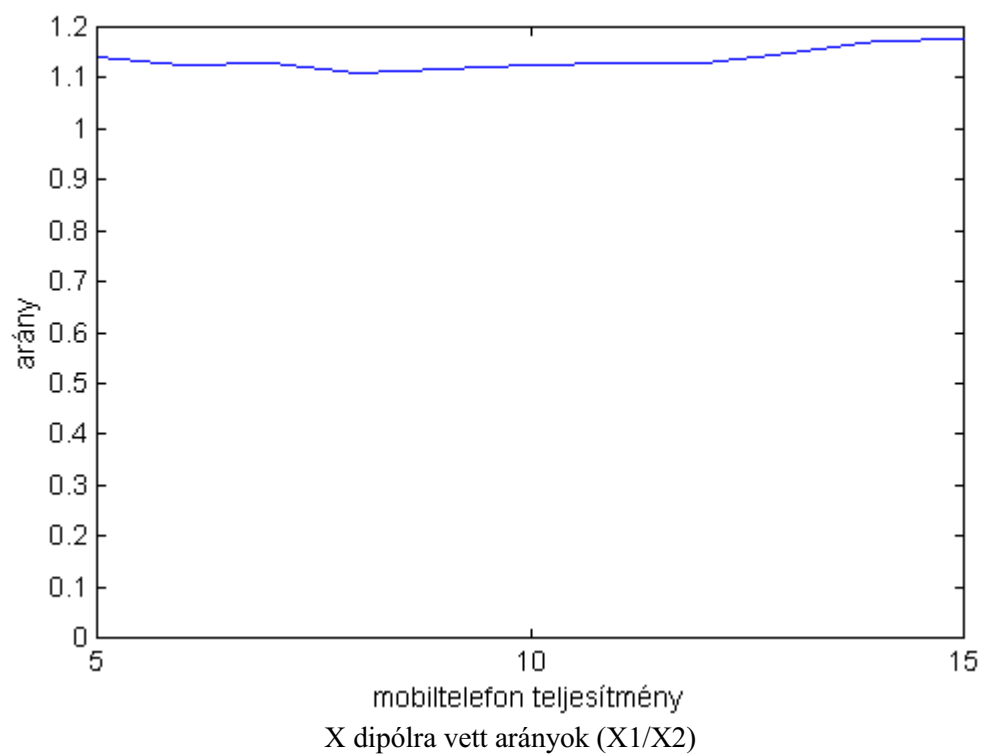


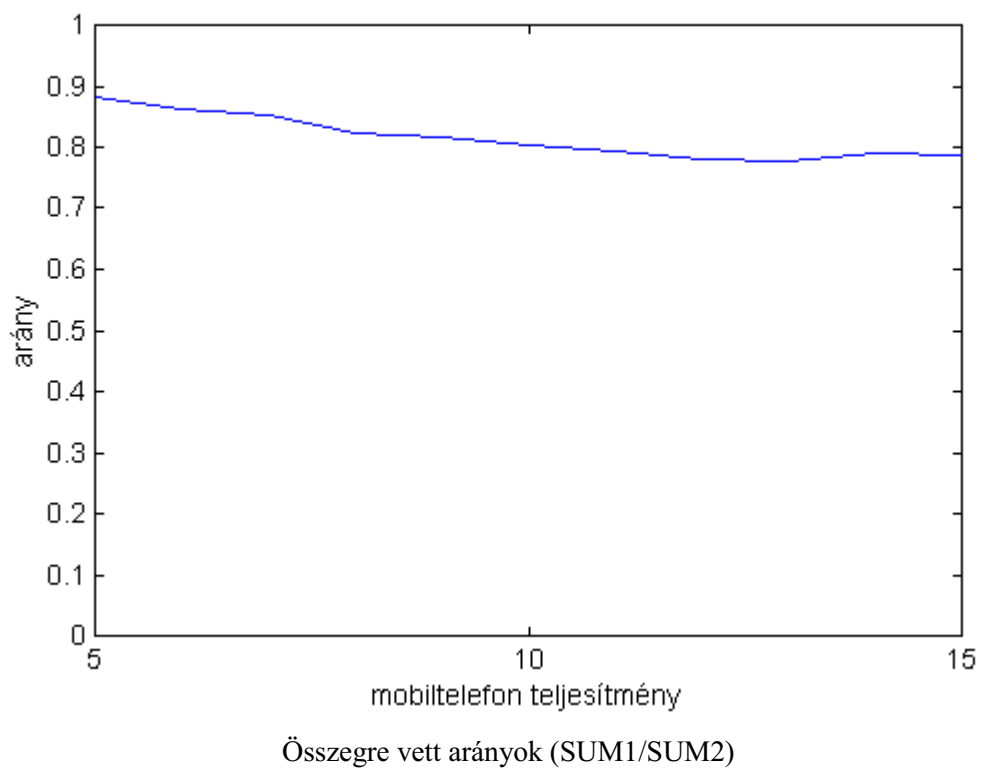
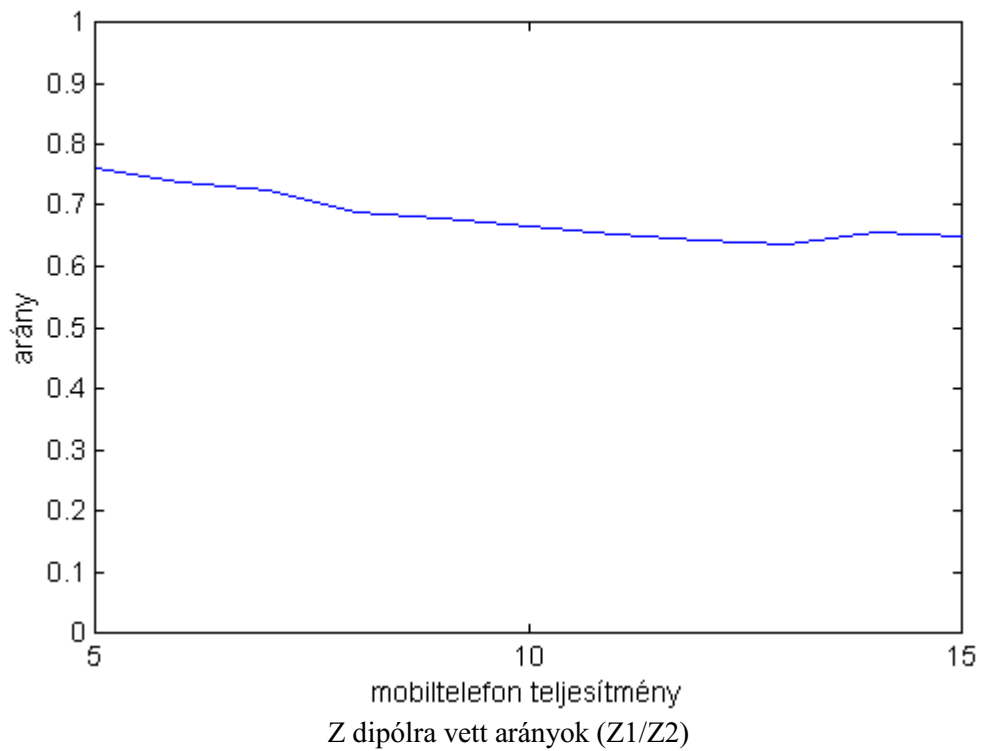
NOKIA 2110-es telefonnal mért karakterisztika – 2



A mérési eredményekből jól lehet látni hogy mobiltelefonokkal közvetlenül nem lehet a mérőfej karakterisztikáját meghatározni, mert a telefonok egyes sugárzási szinteken beállított teljesítményértékei nem túl pontosak. Azonban ezekből az eredményekből is tudunk következtetni az antennakarakterisztikára.

A Nokia 2110-es telefonnal két mérést vettem fel. A két mérés során a mérőfej eltérő távolságra volt a telefonoktól. Ekkor a mérendő sugárzási szint az egyik esetben – ahol a mérőfej távolabb volt – mindig arányosan kisebb volt, mint a másik esetben. Az arányossági tényező a mérés során nem változott, mert az antennát nem mozgattuk. Ha tehát az egyik esetben felvett térteljesítmény értékeket elosztjuk a másik esetben felvett térteljesítmény értékekkel, akkor ideális mérőfej karakterisztika esetén egy vízszintes vonalat kell kapnunk, ami értéke az arányossági tényezővel lesz egyenlő. Ha nem vízszintes vonalat kapunk, akkor az a mérőfej ideális, négyzetes karakterisztikájától eltérő karakterisztikára utal. Az osztásokat elvégeztem külön az X, Y, Z dipólok adataira (zajszint korrigált adataira) és a zajszint korrigált összegre is. Az eredmények a következő ábrákon láthatóak:





Az X dipólnál csak kisebb mértékű eltérés látható a vízszintestől. Ez érthető, mivel itt a kivezérlés sokkal kisebb volt, ezért a karakterisztika eltérése kevésbé tudott érvényesülni. Az Y és Z irányú dipóloknál és persze az összegnél már jól látható az ideálistól való eltérés: az ábrák alapján karakterisztika kb. 10 %-kal térhet el az

ideálistól. Ennek van valóságalapja, mivel ennél az eszköznél a négyzetes karakterisztikát az egyenirányító diódák karakterisztikája állítja elő, a diódák exponenciális karakterisztikájával azonban csak közelíteni lehet a négyzetes karakterisztikát

E.4. A mérőrendszer kimenetén mérhető zaj vizsgálata

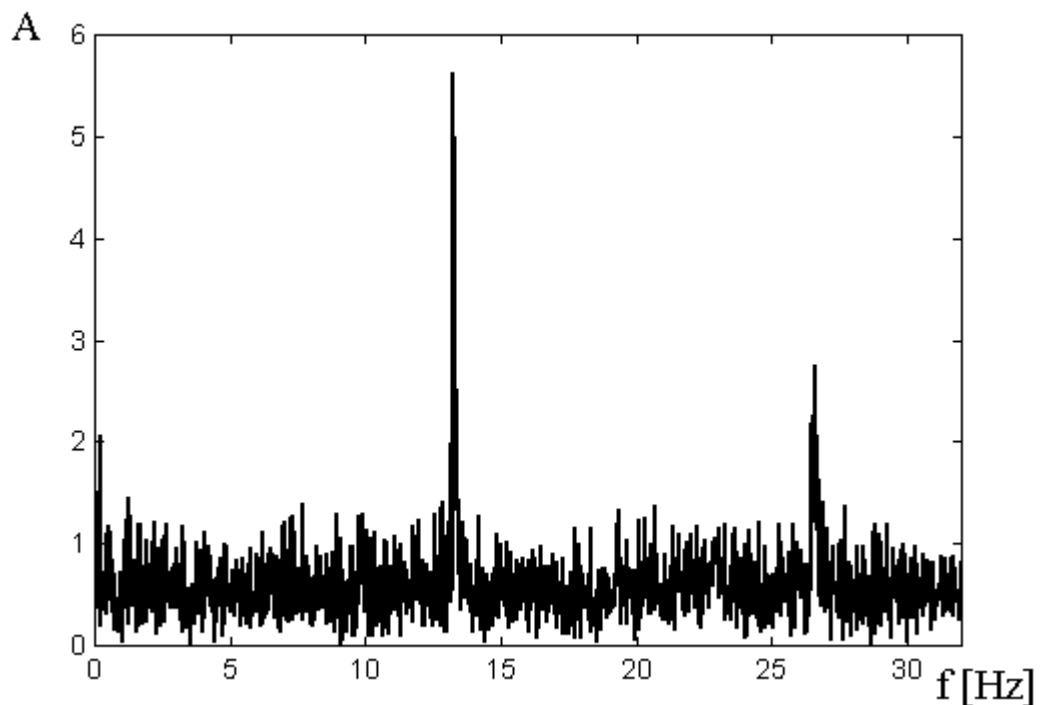
Felhasznált eszközök:

mobiltelefon sugárzásvizsgáló rendszer

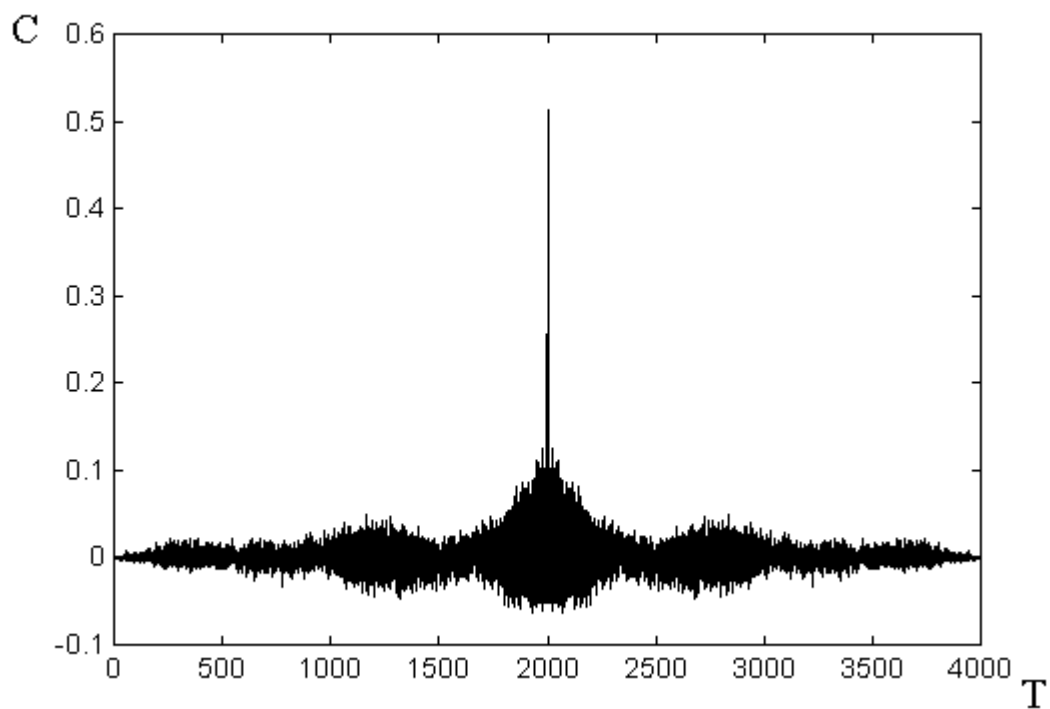
Mérés menete:

Az összeállított rendszerrel elkészítettem egy mérési projektet, amelyben a mérőantenna mozgatása nélkül 2000-szer kellett egymás után teljesítményt mérni. Az egyes mérésekben csak egy mintavétel történt, azaz átlagolást nem használtam. A mérőfej szabadon volt a levegőben, mobiltelefont nem raktam a tartóba. A mérési eredményt szöveges fájlba konvertáltam, hogy MATLAB segítségével fel tudjam dolgozni. Megvizsgáltam a zaj spektrumát, korrelációfüggvényét és eloszlásfüggvényét. A mérési eredmények elkészítéséhez az egyenáramú komponenst eltávolítottam a zajból.

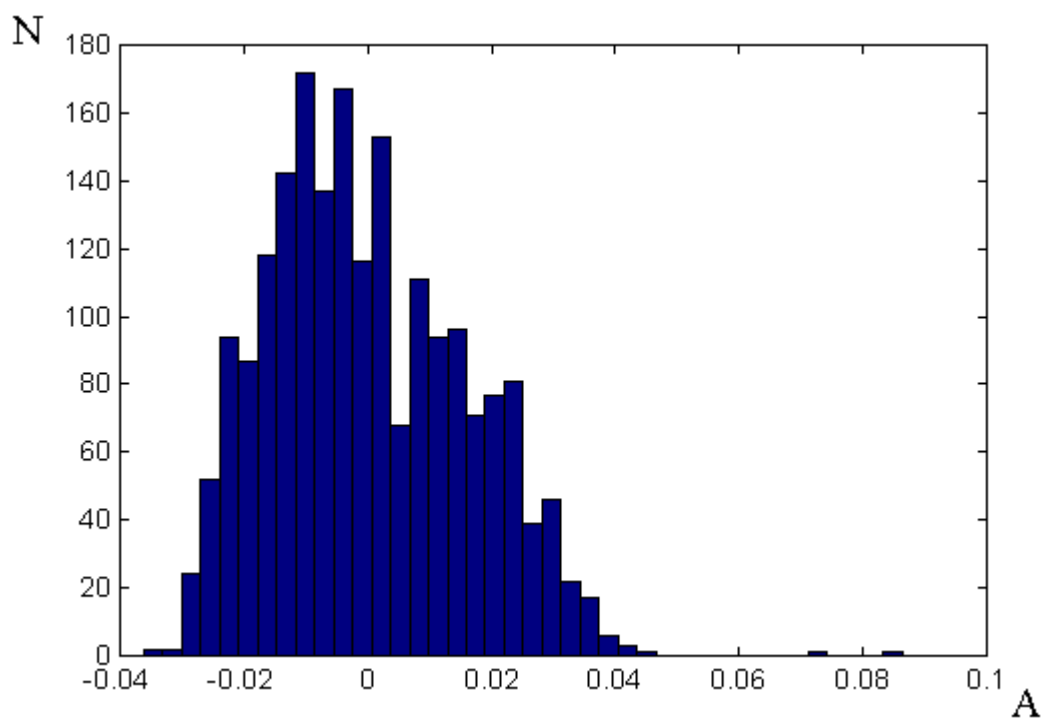
Mérési eredmények:



A zaj spektruma



A zaj korrelációfüggvénye



A zaj hisztogramja

Az eredmények kiértékelése:

A zajspektrumból láthatjuk, hogy a zaj két fő komponensből tevődik össze: egy fehérzaj összetevőből, valamint a hálózati 50 Hz-ből és annak felharmonikusából.

Mivel az A/D átalakító mintavételi frekvenciája kb. 63 Hz, ezért az 50 Hz-es alapfrekvencia a mintavételezés után belapolódott kb. 13 Hz-re, a 100 Hz-es felharmonikus (aminek a legnagyobb része a mérőfej négyzetes karakterisztikáján keletkezett) pedig 26-27 Hz-re lapolódott be.

A korrelációfüggvényen is látszik, hogy a zaj két komponensből tevődik össze. A fehérzaj komponens egy Dirac-deltát hozott létre a korrelációfüggvényben, mert a fehérzaj egymás után következő mintái függetlenek egymástól. A korrelációfüggvény elnyúló részét a zaj periodikus komponense okozza. Ebből az ábrából láthatjuk, hogy ez a zajkomponens annyiban kellemetlen, hogy átlagolás segítségével viszonylag lassan tűnik el. A méréseknél ez a zaj legtöbbször nem okozott gondot, mindenesetre érdemes lenne kiszűrni ezt a komponenst. A mérőrendszer mérőerősítője ugyan tartalmaz egy 11 Hz-es aluláteresztő szűrőt, de ez csak egy 1 törésponti karakterisztikájú szűrő, ezért 50 Hz-en még kicsi a csillapítása. Érdemes lenne még egy további analóg szűrőegységet bekapcsolni a zavar csökkentésére. Digitális szűrő megvalósítása is elképzelhető a mintavételezés után, azonban ez annyiban nehézkes, hogy a szűrő elnyomását 13 Hz alá, azaz nagyon kis frekvenciára kell beállítani. Ekkor a szűrőnek lassú lesz a beállása és ezzel esetleg jelentősen lassíthatja a mérést.

Az utolsó ábrán a zaj amplitúdó-eloszlását lehet látni. Ha az A/D átalakító feszültségfelbontását 1 mV-nak vesszük, akkor láthatjuk, hogy a feszültség kb. 60 egységnyit, azaz majdnem 7 bitet ugrál. Ez jó nagy zajnak számít, de nem nagy baj, sőt még segítségünkre is lehet, mert így átlagolás során alá tudunk menni az A/D átalakító feszültségfelbontási szintjének. Sok esetben A/D átalakításkor direkt zajt kevernek a bemenetre, hogy pontosabbá tudják tenni a mérést az átalakító felbontásánál. Ezt a technikát hívják ditherelési technikának.

Függelék F: A lemezmelléklet tartalma

UnRar.Exe	a RAR tömörített anyagokhoz kitömörítő program
ad/ADconv/adconv.rar	az A/D konverter NYÁK tervei, ORCAD 9.1 fájlok (WinRAR 2.01 tömörített)
ad/ADPIC/adpic.rar	az A/D konverter mikrokontrollerének programja, MPLAB fájlok (WinRAR 2.01 tömörített)
MATLAB/ADCONVKarakterisztika/	Az A/D feszültségstabilitásának vizsgálatához használt adatok és kiértékelő fájlok, az m fájlok MATLAB 5.2-ben íródtak
MATLAB/karakterisztika/	A mérőfej karakterisztikájának vizsgálatához használt adatok és kiértékelő fájlok (MATLAB 5.2)
MATLAB/szintvonalrajz/	A telefonokról készült mérésekből interpolált, szintvonalas ábrákat készítő MATLAB 5.2 program
MATLAB/zajspektrum/	A mérés háttérzaj vizsgálatához használt adatok és kiértékelő fájlok (MATLAB 5.2)
phone/telepites.txt	PHONE program, telepítési útmutató
phone/prog/	A PHONE és MEASURE program
phone/source/ph.rar	PHONE és MEASURE program forráskód (WinRAR 2.01 tömörített)
phone/tvicport/	párhuzamos port meghajtószoftver telepítő-program (a PHONE programhoz)