

Mikrohullámú térmérő szondák

SZENTPÁLI BÉLA

MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet
szentpali@mfa.kfki.hu

Lektorált

Kulcsszavak: E-tér szonda, nagyfrekvenciás térmérés, nagyellenállású tápvonal, térszonda kalibráció

Újajta térmérő szondát fejlesztettünk ki a nagyfrekvenciás és mikrohullámú villamos tér mérésére. Az eszköz minimális mértékben befolyásolja a tér eloszlását. Megoldottuk a szonda bevizsgálását, kalibrációját. Főbb alkalmazási területek: a mobil telefonok okozta expozíció mérése és a kisméretű zártterű EMC vizsgálatok ellenőrzése.

1. Bevezetés

A rádiófrekvenciás és mikrohullámú alkalmazások terjedése több oldalról is felkelti az igényt a nagyfrekvenciás elektromos tér térbeli eloszlásának a mérésére. Ilyen például a téreloszlás meghatározása egy adóantenna közelterében, zártterű EMC vizsgálatok kalibrálása, illetve ellenőrzése, valamint a téreloszlás vizsgálata biológiai anyagokat, testszöveteket szimuláló modellekben, ellenőrizendő a rádiófrekvenciás és mikrohullámú expozíciók (mobil telefonok, orvosi terápiák stb.) okozta hatásokat.

A szabadtéri terjedés vizsgálatára kidolgozott módszerek ezekre a feladatokra nem alkalmazhatók, mert a mérőműszerekről (kalibrált vevőantenna és mérővevő készülék) visszaverődő jel befolyásolná a téreloszlást. E célokra a címben szereplő térmérő szondákat alkalmazzák. Ezek konstrukciója megegyezik abban, hogy az érzékelő elem jelét a mérőműszerhez az elektromágneses térrel minimális mértékben kölcsönható vezeték csatlakoztatja. Az érzékelő elem dipólanntenna a talppontjára szerelt detektor diódával, esetleg termisztorral, vagy termopár oszloppal [1].

Az elvezetés nagyellenállású vezetékpár, erősen rezisztív tulajdonságú tápvonal, amely három funkciót teljesít:

- Elhanyagolható mértékre csökkenti a nagyfrekvenciás jel direkt vételét, azaz nem juttat a diódára jelet. Itt arról van szó, hogy – különösen a miniatűr antennák esetén – az elvezetés akár százszor hosszabb is lehet az érzékelő dipólnál, tehát akár százaléknyi aszimmetria az elvezetés geometriájában a dipól jelével azonos nagyságrendű különbségi jelet adna az érzékelő elemre, ha az elvezetés mentén a rádiófrekvenciás jel nem csillapodna erősen. Ugyan ez a helyzet állna elő, ha az elvezetéssel párhuzamos elektromos tér a két vezeték mentén különbözne, ami erősen inhomogén terekben várható.
- A reflexiója kicsi, azaz elhanyagolható mértékben befolyásolja a téreloszlást.
- Aluláteresztő szűrőként viselkedik.

A teljesség kedvéért megjegyezzük, hogy léteznek optikai elven működő szondák is, ezeknél az érzékelő elem olyan kristály, mely külső elektromos térben kettős törővé válik. Az alkalmas alakúra csiszolt kristályt üvegszára szerelik és az üvegszálon becsatolt, majd a kristályból reflektálódó fény polarizációs síkjának elfordulásából lehet a tér nagyságára következtetni [2]. Ezek a szondáknak az érzékenysége általában kisebb, mint az antennás detektoroké a felépítésük viszont sokkal bonyolultabb. A dipólanntennák helyett elvben hurokanntennát is lehetne használni [3], ezzel azonban az a probléma, hogy az elektromos térre is érzékeny lesz ha a tér változása a hurok mentén jelentős, illetve a detektor aszimmetrikusan helyezkedik el a hurokban. Ilyen szenzorokat általában alacsonyabb frekvenciás tartományokban használnak és a méretük sem miniatűr.

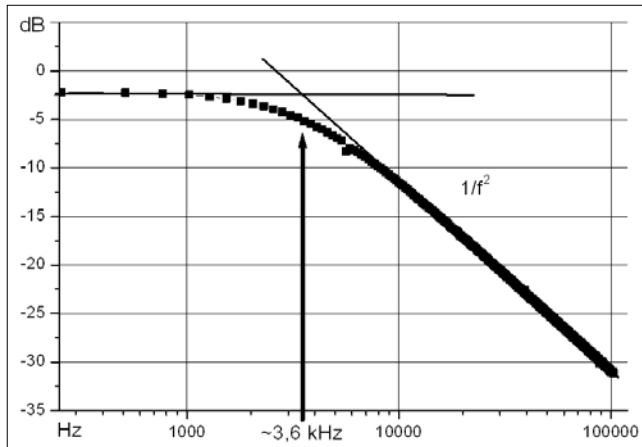
Ebben a dolgozatban csak a diódás detektorral működő térszondákról lesz szó, az MTA MFKI-ban, majd MFA-ban több mint tíz éve folyó munkákat foglaljuk röviden össze.

2. A nagyellenállású tápvonal

Az eszköz kulcseleme a nagyellenállású tápvonal. Kezdetben erre a célra szigetelő hordozóra párologtatott fémrétegből kialakított $\mu\text{-nél}$ vékonyabb és keskeny vezetékeket használtak, ezek ellenállása maximum 0,1 ...1 $\text{k}\Omega/\text{m}$ lehetett [1]. Később a National Bureau of Standards (USA) kifejlesztett speciális korommal adalékolt teflon huzalokat erre a célra; a 0,76 mm átmérőjű huzalok ellenállása 65,6 $\text{k}\Omega/\text{m}$ volt. Vastagréteg technológiával lényegesen nagyobb, akár 1...10 $\text{M}\Omega/\text{m}$ ellenállású vezetékek is nyomtathatók, sőt a paszták megfelelő keverésével és a nyomtatási szélesség és vastagság változtatásával az ellenállás jól reprodukálható módon változtatható.

Kuster csoportja az ETH Zürich egyetemen, illetve spin-off cégük ilyen módon készíti a miniatűr szondák kivezetéseit kerámia hordozón [4]. A vékony kerámia lapokat aztán teflon prizmára szerelik fel és üvegcsővel hermetikusan lezárják. Ezek a szondák a mobil telefo-

nok hatásának a vizsgálatára szolgálnak. Az MTA MFABan (korábban MFKI) készített szondák hordozóanyaga 125 μm vastag, hajlékony poliészter fólia. Erre az anyagra nyomtatható szénpaszták is léteznek, mégpedig kisebb és nagyobb ellenállású is. Ezek keverhetők, a szénpaszta rétegellenállása széles tartományban változtatható. A technológia kidolgozása diplomamunka keretében történt [5] a BME Elektronikai Technológia tanszékén Ripka Gábor tanszéki konzulens vezetésével.



1. ábra
38 cm hosszú 411 $\text{k}\Omega/\text{m}$ ellenállású nyomtatott vezetékpár átviteli karakterisztikája

A nagyellenállású vezetékpár átviteli karakterisztikája az 1. ábrán látható. A spektrum tipikus Lorentz-görbe 3.6 kHz-nél 3 dB-törésponttal és az $1/f^2$ szerinti levágással. Ennek alapján 1 GHz frekvenciára extrapolálva a csillapítás körülbelül 0.3 dB/mm.

Azt, hogy az alkalmazott nagyellenállású vezetékpár mennyire befolyásolja a teret egy GTM cellában vizsgáltuk meg. Egy rövid monopol antennát készítettünk oly módon, hogy egy félmerev koaxiális kábel egyik végéről a külső vezetékét 12 mm hosszan eltávolítottuk. Ezt az antennát adott polarizációs irányban rögzítettük a Piramis 1.8 típusú GTM cellában, az antenna jelét a félmerev kábellel, fix geometriával vezettük a cella átmenő csatlakozójához. Megmértük a transzmissziót a GTM cella betáplálási pontja és a monopol antenna közt, ezt a spektrumot eltároltuk. Ezután behelyeztük a GTM cellába a monopol közelébe a nyomtatott nagyellenállású vezetékét és újra megmértük a transzmissziót. A két transzmissziós spektrum különbségét tulajdonítottuk a behelyezett tárgy teret módosító hatásának. A vizsgálatot a monopol antenna különböző helyzeteiben végeztük el, az IEC 61000-4-20-as előírás szerint 5 mérési ponton egy 0,5x0,5 m^2 -es felületen belül. A mérést természetesen valamennyi mérési pontban megismételtük különböző polarizációk esetén is a monopol antenna három egymásra merőleges elhelyezésével.

Az 2. ábra mutat egy tipikus mérési eredményt.

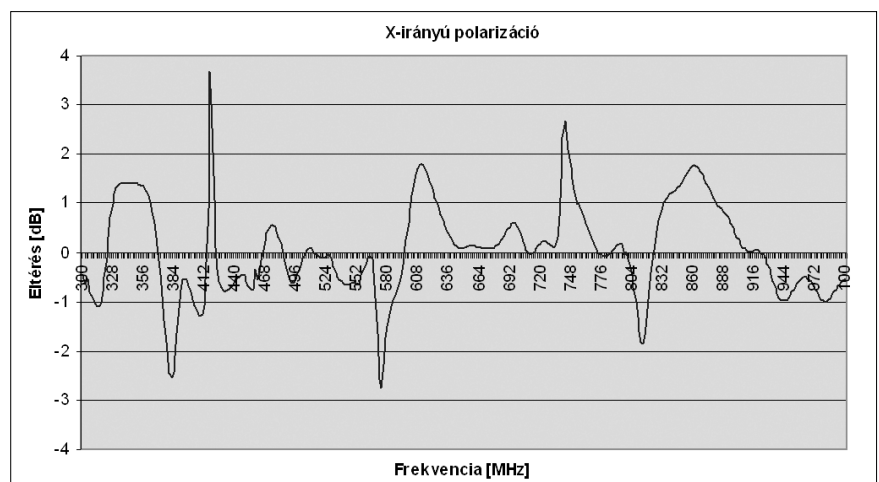
A számos vizsgálat eredménye úgy összegezhető, hogy a szóban forgó nyomtatott vezeték tértorzító hatása valamennyi helyzetben és polarizációnál mindig 1 dB alatt maradt, a 300 MHz...3GHz frekvencia tartományban. Ugyanakkor fémes vezetékét helyezve a GTM cellába minden esetben legalább egy frekvencián a hatás elérte a 6 dB-t, sok esetben meghaladta azt, 10...15 dB eltérés is előfordult a két mérés közt. Ez így volt még a kereskedelmi forgalomban kapható legvékonyabb (1,8 mm külső átmérő) koaxiális kábel esetén is. Ugyanakkor meg kell jegyezni, hogy olyan tárgyak esetén, melyeknek minden méretük hullámhossznál lényegesen kisebb (adapter stb.) a hatás szintén 1 dB alatti.

A tér torzítóhatás tesztelésének egy gyakorlati módja az, hogy egy működő térmérő szonda közelébe, hozzáérítve elhelyezünk egy másik hasonló szondát. Ezeket a kísérleteket különböző geometriai elrendezéseknél megismételve nem találtunk érdemi változást. Azt azért meg kell jegyezni, hogy az ilyen jellegű térmérések gyakorlati pontossága, reprodukciója gondosan végzett mérések esetén is csak ritkán jobb, mint 3 dB.

3. A detektor

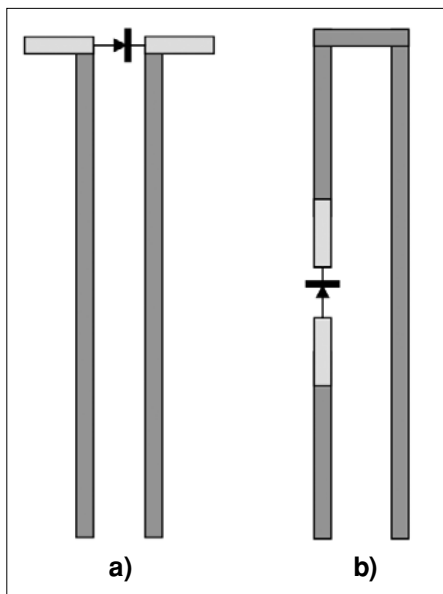
A szondák legérzékenyebb érzékelő eleme az úgynevezett „zero-bias” detektor dióda. Az alacsony potenciálgátú Schottky-diódákat (például p típusú Si-on készített fém-félvezető átmenetek), esetleg az adalékolással modulált potenciálgátú többségi töltéshordozós eszközöket, úgynevezett planárisan adalékolt átmeneteket nevezik így. Ennél bonyolultabb, érzékenyebb megoldás, például előfeszített Schottky-detektor, vagy heterodin vevő a nagyellenállású vezeték miatt nem használható. Kis jelek esetén az úgynevezett „négyzetes karakterisztika” tartományban detektorok kimenő fe-

2. ábra
GTM cellában mért transzmissziós spektrumok különbsége: az 1. ábrán szereplő nyomtatott nagyellenállású, vezeték hatása. Az ábrázolt mérés 300 MHz...1 GHz frekvenciatartományban történt.



szüksége a villamos tér négyzetével arányos, nagyobb jelek esetén az érzékenység csökken. Ezért a kis jelek tartományában az analóg összegzés a villamos tér komponenseinek négyzeteit adja össze és így vektorálisan helyesen határozza meg a tér nagyságát, illetve annak négyzetét.

A rövid dipól antennák iránykarakterisztikája élesen levág az antennára merőleges irányban, az antennával párhuzamos maximum környékén nagyjából izotróp. Egydimenziós szondákat mutat a 3. ábra. Az ábra szerinti egydimenziós szondák esetén a nagyellenállású vezeték antenna hatása az „a” elrendezés esetén közös módusú jelet szállít a diódára, ettől legfeljebb a fent már említett erősen inhomogén tér esetén lehet eltérés, ha a tér különbözik a két vezeték mentén. A „b” esetben a nagyellenállású vezeték véges csillapítása miatt az antenna effektív hossza nő.



3. ábra
Egydimenziós szondák:
a) transzverzális
b) longitudinális

A rajzon a sötétebb vonal a szénpasztával nyomtatott nagyellenállású vezeték, míg az ezüstpasztával nyomtatott antennák a világosabbak.

A legtöbb esetben azonban izotróp szondára van szükség, azaz a tér abszolút nagyságát kell mérni függetlenül a polarizáció irányától. Ehhez három egymásra merőlegesen elhelyezett egydimenziós szondát kell alkalmazni, ezek néhány lehetséges elrendezését mutatja a 4. ábra.

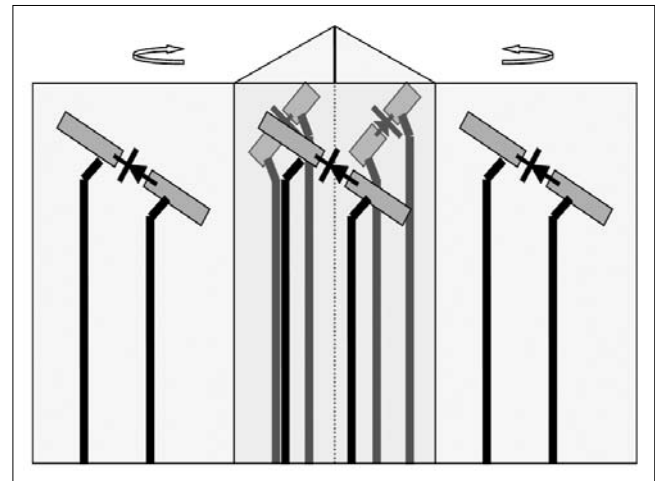
Azért mert az elvezetés egyirányú, a szondák közül legalább kettőt, vagy mind a hármat ferdén érne el a

nagyellenállású vezeték, itt fellép az a probléma, hogy valamilyen mértékben az elvezetés is antennaként viselkedne, ahogy azt fentebb már kimutattuk a nagyellenállású vezeték mm nagyságrendű szakaszon nem csillapít lényegesen. Ezt elkerülendő a szondákról merőleges szakasszal kell elvezetni a jelet. Ennek a rövid szakasznak a csillapítása elég nagy (pl. ~30 dB) kell, hogy legyen ahhoz, hogy a nem egyforma hosszúsággal csatlakozó további elvezetésen képződő különbségi jel elhanyagolható mértékben kerüljön a diódára. Ezért ennek a szakasznak az ellenállása jóval nagyobb, mint az elvezetésé.

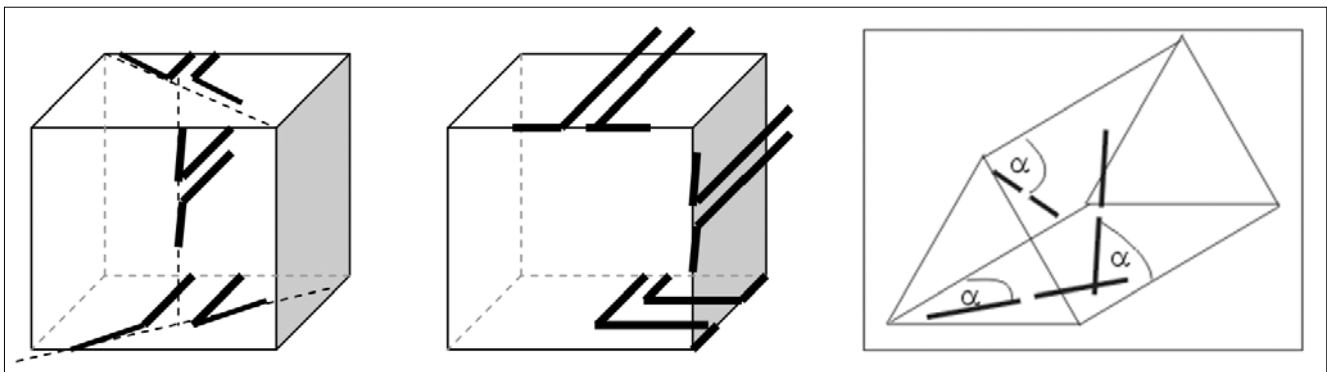
Kezetben a rövid merőleges szakaszt csip ellenállások beültetésével oldottuk meg, később kidolgoztuk ennek a nagyellenállású pasztával való nyomtatását és egyúttal a fólia másik felére nyomtatott folttal a vezetékek közti kapacitást is növeltük [6]. A további (hosszú) elvezetés fajlagos ellenállása ekkor már lehet kisebb, ami a zaj szempontjából előnyös, és ahogy a 2. ábra mutatja a tér perturbálása szempontjából is még megfelelő. Az elvezetésen képződő nagyfrekvenciás jelet elválaszthatjuk a detektortól kisméretű csip alkatrészekből épített RC szűrővel is.

A miniatűr szondák céljára általában a háromszög elrendezést használtuk. Ennek összeállítását rajzát mutatja az 5. ábra.

5. ábra
A háromszög keresztmetszetű szonda három egymás melletti egyforma szonda összehajtogatásával készül.



4. ábra Három egymásra merőleges szonda néhány lehetséges elrendezése izotróp szondához. $\alpha=54,74^\circ$



A szitanyomtatás egyszerre történik egy nagyobb lemezen. Az antennák hajlásszöge a szonda hossztengelegéhez képest $54,74^\circ$. Három egymás melletti szondát kivágunk és az elgyengített (perforált) élek mentén szabályos háromszög keresztmetszetre hajtjuk össze, ekkor a három dipól kölcsönösen egymásra merőleges helyzetbe kerül. A rögzítés a hordozóból kialakított ráhajló peremmel és ragasztással történik, a szigetelés után a végső lezárást és rögzítést rámelegített zsugorcső biztosítja. Az egész szerkezet öntartó, merev, de nem törékeny, mint az üvegcsőbe szerelt kerámiahordozós szonda. A szonda belseje üres, ezért folyadékba mártva (lásd később, az alkalmazásoknál) a folyadék bejut a szonda belsejébe. A szonda vastagsága mindössze $0,25 \dots 0,3$ mm (hordozó + zsugorcső). Így a téreloszlást a szonda eltérő dielektromos állandója a kis térfogat miatt minimális mértékben befolyásolja akár levegőben, akár folyadékban.

6. ábra
Szonda érzékenysége mérése az MFA reflexiómentes helységében kalibrált antennával.



4. A bevizsgálás

A szondák bevizsgálása széles frekvenciasávban mikrohullámú reflexió mentesített helységben („anechoic chamber”) kalibrált antennával történik síkhullámként terjedő térben. Egy ilyen mérési elrendezés fényképét mutatja a 6. ábra.

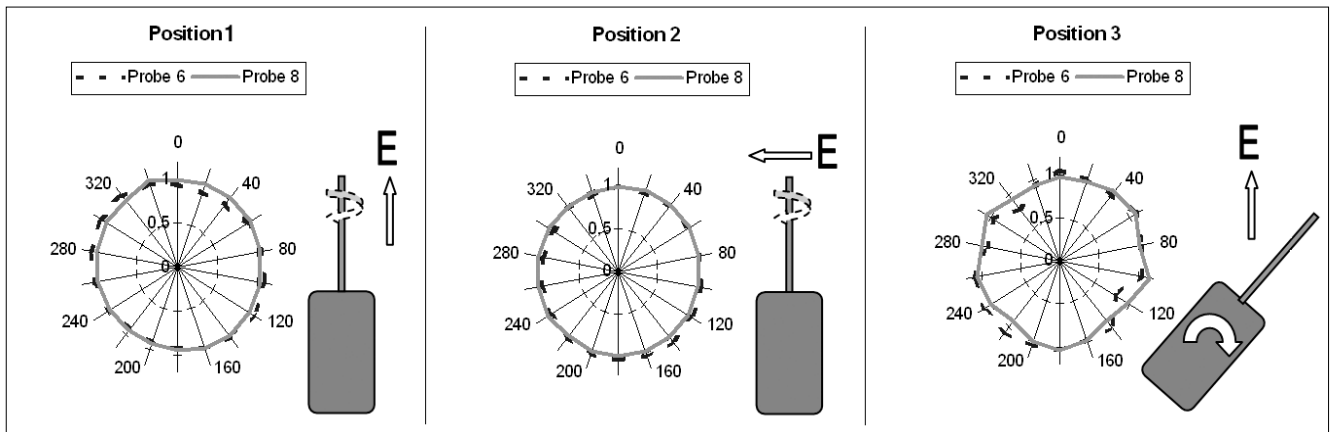
Az izotrópiát a szonda és a villamos tér irányának relatív változtatásával lehet vizsgálni [7]. A 7. ábra mutatja két ilyen mérés eredményét egy miniatűr, 7 mm széles, 30 cm hosszú háromszög konstrukciójú izotróp szonda esetén. A mérések 900 MHz frekvencián 40 V/m térerősségnél történtek. A három detektor jelét erősítés után analóg összegző áramkörre vezettük és ennek kimenetét ábrázoltuk. A két bemutatott szonda az egy sorozatban készült négy példány közül izotrópia szempontjából a legjobb (8. jelű) és a leggyengébb (6. jelű).

Az 1. pozícióban forgatva a szondát tulajdonképpen mind a három dipól változatlan helyzetben van a térhez képest, ezért ez a mérés inkább a mérés körülményeire (tér homogenitása, forgatás egytengelyűsége) jellemző, mint a szondára (például ha egy vagy akár két szonda nem működne, akkor sem észlelnénk változást a forgatás közben).

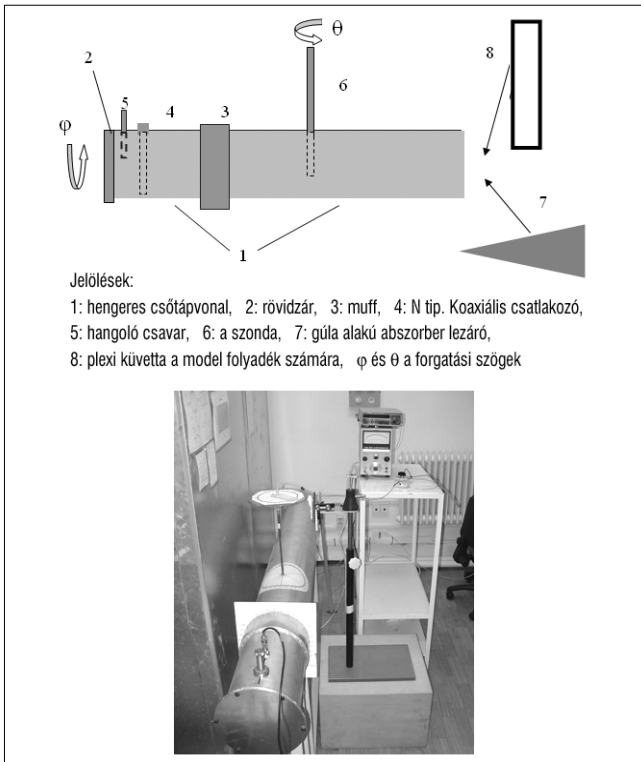
A 2. pozícióban viszont a szondák felváltva kerülnek minimális és maximális pozícióba, itt az izotrópia mértéke a szondák egyformaságát jellemzi. Mindegyik szonda egymagában nyolcas alakú görbét eredményezne a polárdiagrammon. A harmadik pozíció a legkritikusabb, ekkor az előző hatáshoz hozzáadódik a nagyellenállású vezeték esetleges antennahatása és szabad téri mérés miatt a jelfeldolgozó elektronika teret torzító hatása is (ebben jelentős fémtárgy lehet a telep). Az itt bemutatott esetben a gyengébb szonda esetén is a legnagyobb eltérés az átlagtól 20%. Az eltérés alakja nem a várható nyolcas alakú görbe, sőt egyáltalán nem látszik szabályosság az eltérésben. Ezért ennél a mérésnél tapasztalt hibát elsősorban a mérési körülmények bizonytalanságának az elektronikát tartalmazó doboz szóró hatásának tulajdonítjuk.

Itt meg kell jegyezni, hogy ezek a szondák a később ismertetendő mobil telefon expozíciómérésekhez készültek, ahol az elektronika az erősen abszorbeáló mo-

7. ábra Két miniatűr szonda izotrópiájának a vizsgálatra reflexiómentes környezetben.



dell folyadékon kívül, a jelforrással ellentétes oldalon helyezkedik el gyakorlatilag térmentes helyen, tehát az itt gyanított reflexió a felhasználást érdemben nem befolyásolja.



8. ábra
 A szonda kalibrálására épített hengeres csőtápvonal sematikus rajza és fényképe

Egy másik lehetőség a szondák bevizsgálására a tápvonalban történő mérés [8]. Ekkor remélhető a szabad téri bizonytalanságok csökkentése. A 8. ábra mutatja az erre a célra készített hengeres csőtápvonal rajzát és fényképét.

A csőtápvonal végén lévő betáplálási szakasz elforgatható, a jó elektromos kontaktust a forgó és az álló rész közt széles muff alá szerelt rugalmas vezető anyag biztosítja. Ezen a forgatható csonkon egy hangoló csavar is beépítésre került, amivel a betáplálási ponton a reflexió minimalizálható, ilyen hangolással $S_{11} \leq 30$ dB érhető el. Az álló részt egy prizma alakú nyelő zárja le. A forgatható tartóra szerelt miniatűr szonda egy lyukon keresztül nyúlik be a henger közepébe. Mód van a folyadékban történő mérésre is, ekkor a nyelő prizmát eltávolítjuk és egy lapos téglatest alakú plexi küvetta szerelünk az álló rész végére, ennek oldalfala 4 mm vastag, a folyadék réteg pedig 12 mm. Természetesen ekkor a szonda nem a tápvonalba, hanem a folyadékkal töltött küvetta kerül. A cső belső átmérője 218 mm, így a TE_{11} alaplómódus frekvenciasávja: 808,6 MHz...1056 MHz.

(A felső határ a következő TM_{01} módus alsó határfrekvenciája.) A TE_{11} módus esetén elektromos és mágneses tér komponenseit hengerkoordináta rendszerben az alábbi egyenletek írják le [9]:

$$E_z = 0 \tag{1}$$

$$E_\varphi = j \cdot H_0 \cdot Z_0 \cdot \frac{\lambda_c}{\lambda_0} \cdot J_1'(2\pi r / \lambda_c) \cdot \cos \varphi \tag{2}$$

$$E_r = j \cdot H_0 \cdot Z_0 \cdot \frac{\lambda_c}{\lambda_0} \cdot J_1(2\pi r / \lambda_c) \cdot \sin \varphi \tag{3}$$

$$H_z = H_0 \cdot J_1(2\pi r / \lambda_c) \cdot \cos \varphi \tag{4}$$

$$H_\varphi = j \cdot H_0 \cdot \frac{\lambda_c}{\lambda_g} \cdot \frac{\lambda_c}{2\pi r} \cdot J_1(2\pi r / \lambda_c) \cdot \sin \varphi \tag{5}$$

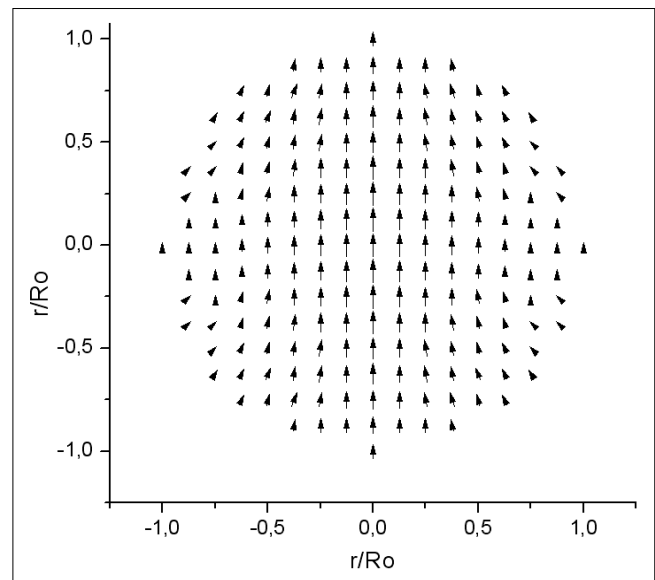
$$H_r = -j \cdot H_0 \cdot \frac{\lambda_c}{\lambda_g} \cdot J_1'(2\pi r / \lambda_c) \cdot \cos \varphi \tag{6}$$

ahol z a cső tengelyébe esik. J_1 és J_1' az elsőrendű Bessel-függvény és annak deriváltja, $Z_0 = 377 \Omega$. A H_0 amplitudó dimenziója A/m. $\lambda_c = 1.71 \cdot D$ a határhullámhossz, ahol D a cső belső átmérője, λ_g és λ_0 a hullámhossz a tápvonalban és a szabad térben:

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \lambda_0^2 / \lambda_c^2}} \tag{7}$$

E_r és E_φ meglehetősen homogén a cső középpontja körül. A 9. ábra mutatja ezt az eloszlást, míg az 1. táblázat számszerűen foglalja össze a maximális eltéréseket a középpont körüli 10% és 20%-nyi tartományokban.

A mi esetünkben ($D=218$ mm) a belső 10%-nyi tartomány is már jóval nagyobb, mint a miniatűr szonda mérete. Tehát a 8. ábra szerinti forgatások során a szonda detektora homogén térben történik.

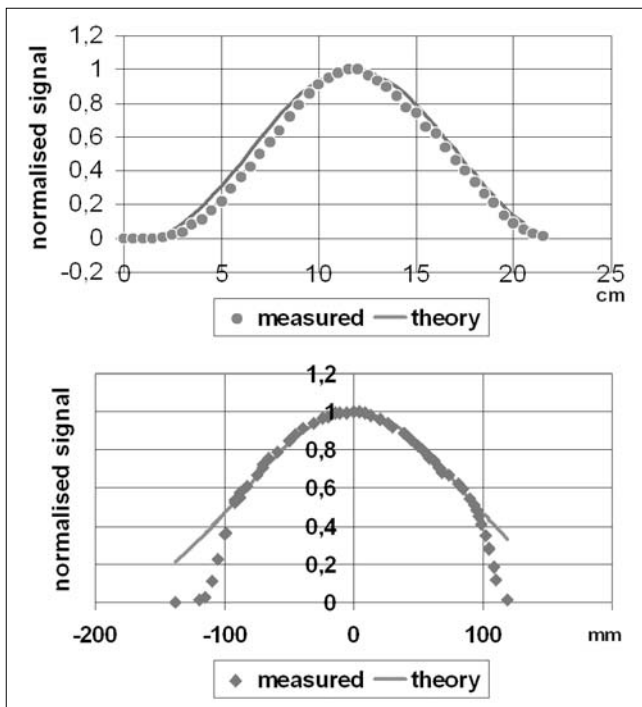


9. ábra
 A villamos tér eloszlása a tápvonal keresztmetszete mentén

Tartomány	E maximális eltérése a középvonali értéktől	Maximális szögeltérés φ [fok]
$r \leq 0.1 \cdot R_0$	1.27%	0.24
$r \leq 0.2 \cdot R_0$	5%	0.98

1. táblázat

Ezt a tényt mérésekkel is igazoltuk, az eredmények a 10. ábrán láthatók. A 3/a. ábrán bemutatott szondával E_{ϕ}^2 , míg a 3/b. ábrán látható szondával E_r^2 volt feltérképezhető.



10. ábra
A villamos tér eloszlásának mérése a tápvonalban
fent: $E_{\phi}^2(r, \varphi=0)$; lent: E_r^2

A módszer gyengéje, hogy csak a csőtápvonal alapmódusának sávjában használható, más frekvenciatartományra más méretű csőtápvonal kell, a magasabb frekvenciákon pedig már a cső átmérője úgy lecsökken, hogy a $r \leq 0.1 \cdot R_0$ méret kisebb lesz a szonda detektoránál.

A 11. ábrán látható egy háromszög konstrukciójú izotróp szonda detektorainak mérése a hengeres csőtápvonalban. Ebben az esetben is a 6. ábra 3. pozíciójának megfelelő forgatás esetén van a legnagyobb különbség a szondák közt, de itt az eltérés szabályos szögfüggést mutat, az egyes detektorok különböző érzékenységeivel magyarázható, illetve korrigálható.

5. Alkalmazások

A miniatűr szondák a mobil telefonokkal kapcsolatos nagyfrekvenciás expozíció vizsgálatára szolgáltak. Erre a vizsgálatra a CENELEC a modellben, úgynevezett fantomban való mérést ajánlotta. Ez az eljárás később európai, majd magyar szabvánnyá vált [10].

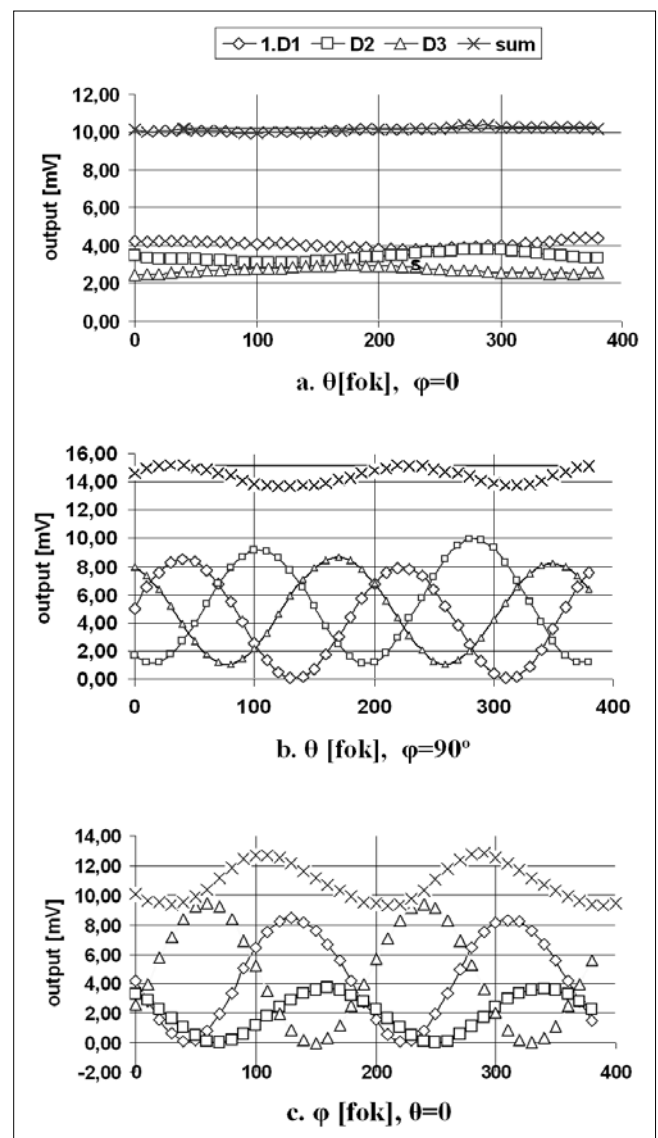
A fantom egy jól leírt emberi fej formájú üveg, vagy műanyag edény, melyet az emberi agyvelővel azonos dielektromos állandójú és vezetőképességű folyadékkal töltenek meg. E folyadékok paraméterei és összetételük is elő van írva [10], mivel a dielektromos állandó és különösen a vezetőképesség függ a frekvenciától minden a mobil telefóniában használt frekvenciasávra külön oldatot kell készíteni. A preparált, ismert teljesítmény-

nyel működő mobil telefont előírt helyzetekben kell a fantom füléhez igazítani és mérni kell a nagyfrekvenciás villamos tér eloszlását a fantom belsejében a telefon közelében. A mért térerősség értékekből az úgynevezett fajlagosan elnyelt teljesítményt (FET) kell meghatározni:

$$FET = \frac{\sigma E^2}{\rho} \left[\frac{W}{kg} \right] \quad (8)$$

ahol E , σ és ρ rendre a villamos tér nagyságát, a vezetőképességet és a sűrűséget jelentik. A mérést az európai szabvány szerint 10 g folyadékot magába foglaló kocka alakú térfogatban kell átlagolni és a megengedett határérték 2 W/kg. Az USA előírások ugyan ilyen mérési eljárást írnak elő, de az átlagolási térfogat csak 1 g folyadékot tartalmaz és a határérték 1,6 W/kg. Tekintettel arra, hogy a villamos tér igen erősen csillapodik a fantom belseje felé haladva az átlagolásokba igen kis értékek is beleszámítanak. Ezért a kisebb kocka lényegesen szigorúbb feltétel az amerikai előírásoknál,

11. ábra
Háromszög konstrukciójú izotróp szonda egyes detektorainak mérése a hengeres csőtápvonalban

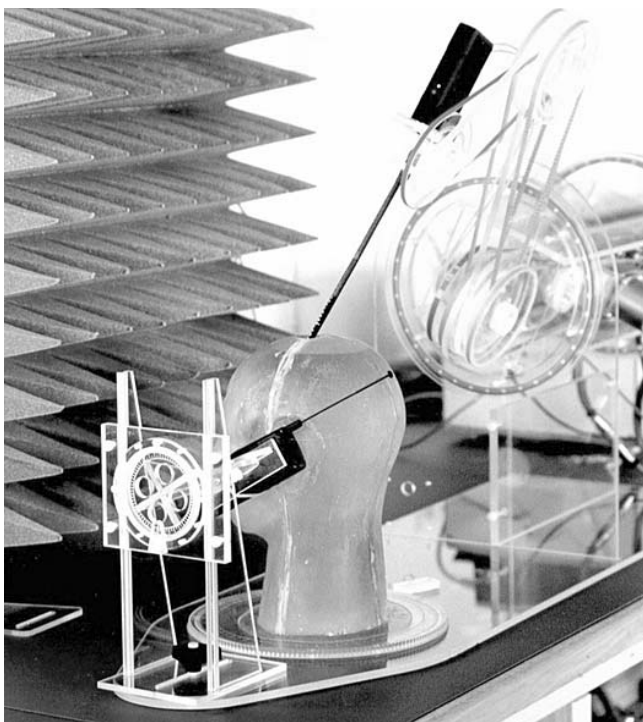


mint az alacsonyabb határérték. Összességében az USA előírások körülbelül háromszor kisebb expozíciót engednek meg, mint az európaiak. Ezt az alacsonyabb határértéket az NADC rendszerek jobban teljesítik, mint az Európában használatos GSM rendszerek.

A szonda szempontjából a miniatürizálás azért fontos, hogy a körülbelül 2, illetve 1 cm élhosszúságú tartományon belül minél több mérési pontot lehessen felvenni. (A mért E^2 értékeket a három detektor súlypontjához rendeljük.) Az intézetben kétféle háromszög konstrukciójú szondát készítettünk; 7 mm és 4,5 mm szélességűeket, hosszuk 300 mm körül volt. A keskenyebb szonda a rövidebb dipól miatt értelemszerűen kisebb érzékenységgel rendelkezik. A legkisebb – 3,2 mm-es élhosszúságra elkeskenyedő – szondát Molnár Ferenc Balázs készítette a diplomamunkája során [11].

A 7 mm széles szonda tipikus érzékenysége 900 MHz-es fantom folyadékban 20 mV/(W/kg), 1800 MHz-es fantom folyadékban pedig csak 9 mV/(W/kg). Az érzékenységek különbségét az okozza, hogy a magasabb frekvenciájú fantom folyadék vezetőképessége nagyobb, ezért ugyanakkora FET értékhez kisebb villamos tér tartozik. Ha a FET megközelíti, vagy éppen meghaladja a 2 W/kg határértéket, akkor a dióda (különösen, ha a polarizáció az egyik antennával párhuzamos) már nem a négyzetes detektálási tartományban működik, itt már az érzékenysége csökken és a fenti értékkel számolva kisebbnek mérnénk a FET-et a valódinál. Ezért célszerű a mérést csökkentett mobil telefon teljesítménynél végezni, ami azzal az előnnyel jár, hogy a hőhatások elhanyagolhatóak lesznek. Nem melegsik a folyadék olyan mértékben, hogy az elektromos paraméterek változását figyelembe kelljen venni, illetve nem indulnak meg turbulens áramlások. Az analóg leolvasás 1...2 Hz sávszé-

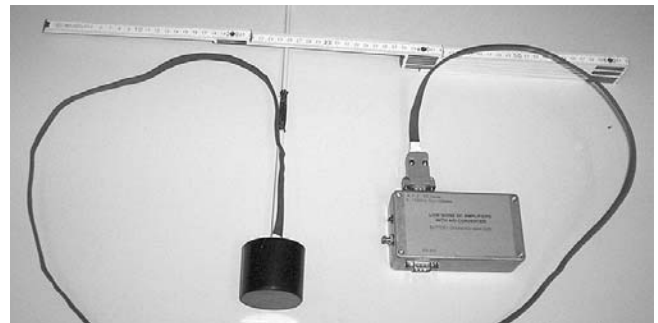
12. ábra FET mérés a SARTEST Ltd.-nél



lességnek felel meg, ebben a tartományban a szonda zajfeszültsége tipikusan $0,3 \mu\text{V}/\text{Hz}^{1/2}$ nagyságrendű, a tangenciális érzékenység így mW/kg körüli érték, tehát körülbelül százszoros dinamika tartomány még nagy pontossággal biztosítható korrekció nélkül is. Szükség esetén a dinamika tartomány tovább szélesíthető, ha a mérést nem állandó mobil teljesítménynél végezzük, hanem azt célszerűen változtatjuk, ez a módszer a mikrohullámú technikában szokásos és a mobil telefonok elektronikája is alkalmas a kimenő teljesítmény változtatására. Egy ilyen mérés fényképét mutatja a 12. ábra.

A mérés az angliai SARTEST Ltd. laboratóriumában történt a tőlünk vásárolt szondával és saját fejlesztésű mozgó robottal és kiértékelő szoftverrel.

Egy másik alkalmazás a térmérés kis térfogatú zárt EMC mérőhelyeken. Számos esetben szükség van fejlesztés során EMC immunitási és emissziós próbára. A nyíltterű, vagy a nagyméretű reflexió-mentesített mérőhelyekhez való hozzáférés drága, előre tervezett módon vehető igénybe. Ezért szükség van kisméretű mérőhelyekre is, melyek lehetnek gyengén reflexió-mentesített (hozzávetőlegesen -10 dB reflexiójú falakkal határolt) kis helyiségek, vagy inkább csak dobozok, TEM, vagy GTEM cellák. Ezekben a terekben rezonanciák alakulhatnak ki és ezért bizonyos frekvenciákon a tér eltér a várttól. Bonyolítja a helyzetet, hogy a kis méret miatt a rezonancia frekvencia függhet a vizsgált tárgy méretétől, elhelyezkedésétől is. Ezért a közvetlen térmérés jelentősen növeli az ilyen vizsgálatok megbízhatóságát. Természetesen ismét fontos szempont, hogy maga a térmérő szonda ne befolyásolja a téreloszlást. Erre a célra fejlesztett készülék fényképét mutatja a 13. ábra.



13. ábra
Az EMC vizsgálatokhoz készített szonda az 1,7 m hosszú hajlékony elvezetéssel és a jelfeldolgozó elektronikát tartalmazó dobozzal.

A mérőfej ebben az esetben a 4/b. ábra szerinti elrendezésű, a nagyellenállású tápvonal hossza pedig 1,7 m [12]. Az elvezetés nincs háromszög elrendezésben összeillesztve, így a vezetékek hajlékony. A szonda a mérőrendszer tartozéka, bárhova helyezhető a tér érdemi befolyásolása nélkül. Az EMC vizsgálatoknál szükséges nagy sáv szélesség (80 MHz...18 GHz) itt már szükségessé teszi, hogy a frekvencia szerint változó érzékenységekkel korrigáljuk a méréseket. Ezért ennél a szondánál már az erősítő után digitalizáljuk a jelet és számítógépbe vezetjük. WINDOWS alatt futó célprogramot fejlesztettünk ki, ami a mérési adatokat gyűjti, át-

lagolja, a begépelt frekvencia szerinti érzékenységet veszi figyelembe és a nagy tereknél fellépő érzékenységcsökkenést korrigálja, a detektor diódán mért feszültség alapján. A mérést a kezelő a grafikus felületen az egérrel mozogva vezérli, klikkelléssel indítja. Csupán a fájlnevet kell begépelni adott szintaxis szerint, úgy, hogy az tartalmazza a frekvenciát is.

6. Összefoglalás

Számos esetben szükség van a nagyfrekvenciás, illetve mikrohullámú villamos tér közvetlen mérésére oly módon, hogy az a tér eloszlását ne befolyásolja. Erre a célra térmérő szondákat fejlesztettünk ki. A szondák rövid dipól antennába szerelt zero-bias detektor diódákkal érzékelik teret, a detektorok kimenő egyenfeszültségét nagyellenállású tápvonallal vezeti tovább a feldolgozó elektronikához. Az általunk kifejlesztett szondák speciális tulajdonsága az, hogy a hordozó hajlékony műanyag fólia, ami egyaránt lehetővé teszi a flexibilis elvezetést és az önhordó, merev, de nem törékeny kivitelét. Az alkalmazott anyagok minimalizálják a szonda térfogatát, így annak eltérő dielektromos állandója sincs érdemi hatással a tér eloszlására. Folyadékban történő mérések esetén a szondát kívül-belül körbeveszi a folyadék. Mind egy-polaritású, mind izotróp szondák építése lehetséges ezzel a technikával.

Bemutattuk, hogy a szonda teret torzító hatása 1 dB-nél kevesebb, jellemzően néhány tized dB. A szondák bevizsgálását széles frekvenciatartományban reflexiótól mentesített helységben kalibrált antennák definiált terében végezzük. Az érzékenység és az izotrópia precíz vizsgálatára hengeres csőtápvonalból alakítottunk ki keskeny sávú mérőberendezést.

A főbb alkalmazási területek:

- A mobil telefonok okozta mikrohullámú expozíció mérése. A szondák alkalmasak a szabvány szerinti vizsgálatok megfelelő pontosságú kivitelezésére.
- Kisméretű zárt terű EMC vizsgálatoknál a tér ellenőrzése.

Köszönetnyilvánítás

Ezek a munkák kisebb-nagyobb részben részesültek az alábbi pályázati támogatásokból:
 MTA AKP 96/2-604 2,3 szám alatti projektje (1996-1997)
 EU COPERNICUS „MEMSWAVE” projekt (1998-2001)
 Közlekedési, Hírközlési és Vízügyi Minisztérium fejezeti kezelésű előirányzatának a támogatása (1999)
 OTKA M 036828 sz. műszer beszerzési projekt (2001)
 OTKA M 045352 sz. műszer beszerzési projekt (2004)
 GVOP-3.1.1.-2004-05-0354/3.0 sz. projekt (2004-7)
 Természetes személyek közül igen sokat köszönhetek Ripka Gábornak, aki a szondák előállításával foglalkozó diplomamunkások munkáját irányította.
 Kezdetben, amikor még nem épültek ki a saját bevizsgáló méréseink, mérési lehetőséget és segítséget kaptam

G. Neubauer-tól és G. Schmid-től az osztrák Forschungszentrum Seibersdorfban, majd hasonló segítség, illetve tartós együttműködés alakult ki M. Manning-gal az angliai SARTEST Ltd.-nél.

A szondák fantom anyagban való kalibrációját Prof. O. Gandhi volt szíves elvégeztetni tanszékén, a University of Utah-on (USA).

Irodalom

- [1] H. Bassen, G.S. Smith, Electric Field Probes – A Review, IEEE Trans. on Antennas and Propagation, Vol. AP-31, pp.710–718., 1983.
- [2] W. Schwedt, J. Berger, B. Schüppert, K. Peterman, Integrated optical E-field sensors with a balanced detection scheme, IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, 39., pp.386–389., 1997.
- [3] H. Whiteside, R.W.P. King, The Loop Antenna as a Probe, IEEE Trans. on Antennas and Propagation, Vol. AP-12, pp.291–297., 1964.
- [4] T. Schmid, O. Egger, N. Kuster, Automated E-Field Scanning System for Dosimetric Assessments, IEEE Trans. on Microwave Theory and Technique, 44., pp.105–113., 1996
- [5] Németh Adrián, Nagyfrekvenciás térmérő szonda gyártástechnológiájának kidolgozása, BME diplomamunka, 1997.
- [6] Harasztosi Zsolt, Polimer vastagrétegek a mikroelektronikában, BME diplomamunka, 2001.
- [7] B. Szentpáli, Vo V. Tuyen, G. Thúróczy, Novel E-Field Probe for Measurements in Phantoms, Proc. of 10. MICROCOLL, March 21-24, Budapest, pp.453–456., 1999.
- [8] B. Szentpáli, G. Thúróczy, Circular waveguide for calibration of miniature E-field probes, Proc. of 11. MICROCOLL, September 10-11, pp.189–192., 2003.
- [9] Istvánffy Edvin, Tápvonalak, antennák és hullámterjedés, BME egyetemi jegyzet, Tankönyvkiadó, 1985.
- [10] MSZ EN 50361
- [11] Molnár Ferenc Balázs, A GSM rendszerű rádiótelefonok élettani hatásának vizsgálatához mérőszonda fejlesztése, BME diplomamunka, 2002.
- [12] B. Szentpáli, I. Réti, F.B. Molnár, J. Farkasvölgyi, K. Kazi, Z. Mirk, A. Sonkoly, Z. Horváth, E-field probe for closed space EMC measurements, Proc. of the Mediterranean Microwave Symposium, 14-17 May, Budapest, pp.89–92., 2007.