

Aktívne biosenzorické implantáty - od Goliáša k Dávidovi

Kováč Martin · Elektrotechnika

16.11.2015



V bioelektronike sa snažíme vyvíjať elektronické systémy a zariadenia, ktoré by mohli napomôcť k využitiu súčasných špičkových technológií v aplikovanej medicíne. Tento článok je venovaný progresívnym zariadeniam tzv. aktívnym biosenzorickým/senzorickým implantátom (ABSI), ktoré v globálnom aspekte predstavujú široký priestor pre aplikovateľnosť bioelektroniky ako takej. Konkrétne pojednáva o inovatívnom prístupe (integrácii antény pre bezdrôtovú komunikáciu priamo na čipe), ktorý by mohol priniesť nový vietor do problematiky ABSI, najmä z pohľadu ich miniaturizácie. Inak povedané, dostali by sme sa od Goliáša (robustné diskkrétne riešenie antény) k Dávidovi (miniaturná anténa integrovaná ako súčasť elektronického systému na čipe).

1. Úvod

V poslednej dobe sa systémy asistovaného života (angl. ambient-assisted living – AAL) stávajú neoddeliteľnou súčasťou života mnohých ľudí a významným spôsobom skvalitňujú ich život. Jedným z najdôležitejších cieľov AAL programu je úspešné zavedenie systému domácej starostlivosti o pacienta, ktorá je založená na bezdrôtovom prenose dát medzi telovou sieťou (angl. WBAN) a personálnym serverom pacienta. Personálny server následne zabezpečuje prenos dôverných osobných údajov autorizovanej osobe (napr. lekár).

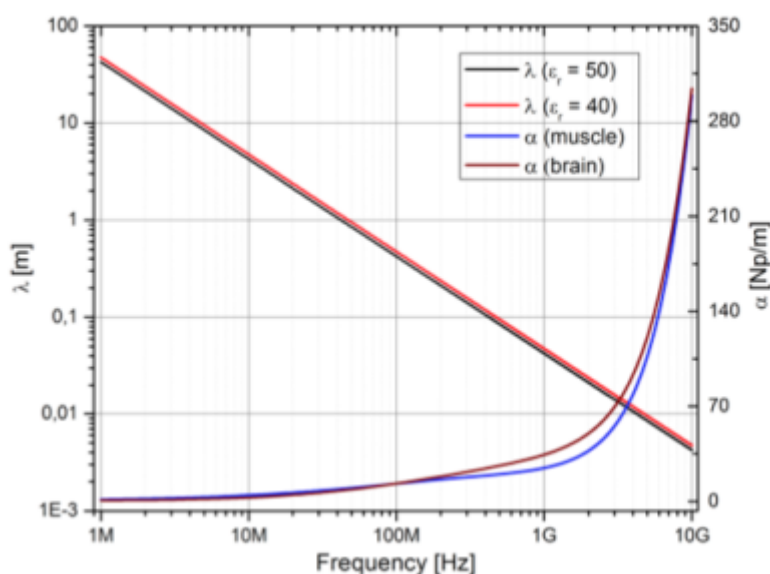
Jeden z najkritickejších problémov v takomto AAL systéme je vytvorenie komfortnej a bezpečnej monitorovacej bezdrôtovej siete, pozostávajúcej zo senzorických/biosenzorických uzlov umiestnených na/v ľudskom tele. Špeciálna starostlivosť musí byť venovaná tzv. aktívnym implantovateľným medicínskym zariadeniam (AIMZ), ktoré sú však definované veľmi všeobecne. Preto zavedieme pojem ABSI, pod ktorým budeme rozumieť druh AIMZ s permanentným rezervoárom elektrickej energie (napr. batéria). Tento rezervoár energie zabezpečuje monitorovaciu autonómnosť zariadenia a možnosť inicializovať bezdrôtovú komunikáciu a prenosu údajov. Širšie využitie ABSI systémov je ale značne komplikované vysokou spotrebou komunikačného modulu. Mnohí vedci sa v súčasnosti domnievajú, že budúcnosť patrí ultrazvukovej komunikácii [1], komunikácií postavených na vodivých vlastnostiach tkaniva ako je napríklad v prípade MiroCam® od IntroMedic [2] alebo NanostimTM od St. Jude Medical [3], prípadne induktívnej komunikácii.

V porovnaní s vyššie uvedenými technológiami, hlavnou nevýhodou bezdrôtovej komunikácie na báze rádiových vln (RF komunikácie) je väčší útlm v ľudskom tkanive v

rámci pracovných frekvencií. To vedie k potrebe použiť vyšší vyžiarený výkon za účelom zachovania spoľahlivého prenosu, čo ale obmedzuje jej nasadenie pre hlbšie implantované ABSI. Aj napriek tejto nevýhode atraktivita RF komunikácie tkvie v schopnosti preniesť informáciu do externého prostredia (t.j. mimo ľudského tela) a zároveň v odolnosti voči vzájomnému priestorovému vychýleniu prijímača/vysielača. Prínosom RF komunikácie je tak dosiahnutie cieleného komfortu (oproti indukčivnému prenosu) a vynechanie nutných biosenzorov umiestnených na povrchu tela (Obr. 1) s cieľom zlepšiť kvalitu života pacienta, aj keď za cenu obmedzeného využitia komunikácie. Navyše, kompatibilita s už dostupnými inteligentnými zariadeniami (ako napríklad smart telefóny alebo hodinky s podporou GSM, WIFI, Bluetooth, atď.) a tiež jednoduchšia realizácia vysielacieho/prijímacieho člena – antény (v porovnaní s ultrazvukovou komunikáciou) je tiež vítaným benefitom.



Obr. 1 Možné využitie navrhnutého konceptu v budúcnosti.



Obr. 2 Závislosť vlnovej dĺžky λ od frekvencie pre konštantné ϵ_r (bezstratové)

prostredie), a konštanty útlmu α od frekvencie pre rovinnú vlnu (stratové prostredie).

2. Navrhovaný ABSI koncept

Počiatočná fáza nášho výskumu bola zameraná na redukciiu spotreby energie ABSI systémov, konkrétne na bezdrôtový komunikačný modul (vo forme integrovaného obvodu ako súčasti systému na čipe – SoC), ktorý patrí v súvislosti so spotrebou medzi tie najproblematickejšie, nakoľko jeho vlastná spotreba je zvyčajne vyššia ako 1 mW. Navrhnuté riešenie modulu pozostáva z tzv. hybridného vysielacza/prijímača, kde vysieláč je založený na impulznej širokopásmovej komunikácii (IR-UWB), pričom odhadovaná spotreba energie vysielacza sa môže pohybovať na úrovni 10-100 pJ/bit. Naopak prijímač využíva úzkopásmovú komunikáciu v nízkopríkonovej konfigurácii Wake-up (Tab.1). Keďže FCC (angl. Federal Communications Commission) vyhradila pre UWB komunikáciu frekvenčný rozsah 3,1 – 10,6 GHz, existuje predpoklad využiť pre úzkopásmovú komunikáciu najbližšie nižšie ISM pásmo t.j. 2,45 GHz.

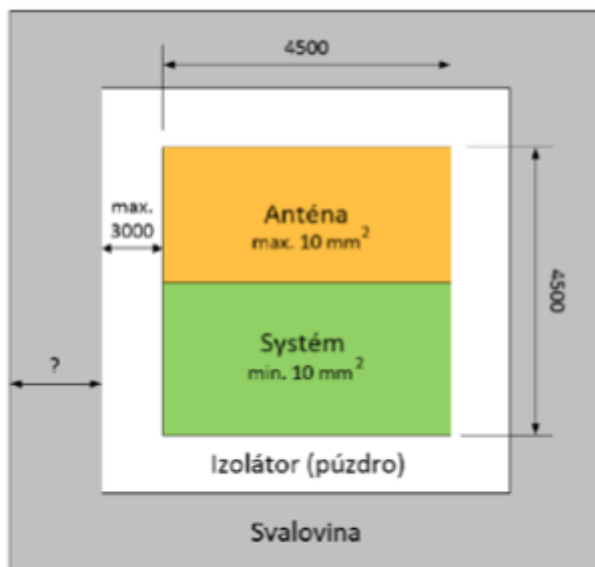
Priamo z pracovných frekvencií je zrejmé, že v najlepšom prípade sa bude maximálna hĺbka umiestnenia implantátu pohybovať na úrovni jednotiek cm (stredná hĺbka implantátu) z dôvodu vysokého útlmu v mäkkom tkanive (Obr.2). Z Obr.2 je tiež možné pozorovať, že použiteľné bude len spodné frekvenčné pásmo IR-UWB komunikácie, t.j. 3,1 – 5,0 GHz, pretože konštanta útlmu α rapídne rastie už za hranicou cca 4 GHz. Potešujúce je, že použitie vyšších frekvencií vedie k potenciálnej možnosti integrácie antény priamo na čip spolu so zvyškom systému, a tým prispieť k miniaturizácii ABSI, čo je jedným z primárnych cieľov výskumu. Antény realizované na čipe (špeciálne ak sa jedná o štandardnú CMOS technológiu) sú ale charakteristické veľmi malou radiačnou účinnosťou a teda aj ziskom (pozri Obr.3), čo limituje ich použitie pre ABSI. Z toho dôvodu bolo žiaduce prioritne vymyslieť spôsob zvýšenia radiačnej účinnosti antén realizovaných na čipe a zabezpečiť tak ich aplikovateľnosť v bioenzorických implantátoch.

Tab. 1 Ciele výskumu a navrhnuté riešenia.

Všeobecne stanovené ciele:	Riešenia:
1. redukcia spotreby plochy	použitie hybridnej konfigurácie vysieláč/prijímač
2. miniaturizácia ABSI	integrácia antény na čip (štandardný CMOS proces)
3. zachovanie aplikovateľnosti RF komunikácie pre ABSI	zvýšenie radiačnej účinnosti integrovanej antény prostredníctvom PDV
4. splnenie limitov týkajúcich sa vplyvu EM poľa na ľudské zdravie	

antenna type	spiral-slot	triple-resonance dipole	monopole	multiturn dipole	loop
lower freq. [GHz]	≈ 8.5	3.5	8	5.7	5.2
freq. band [GHz]	≈ 2	23	2	0.1	-
gain [dBi]	-10	≈ -16.3	-27.4	-29.8	-22
shielding	yes	no	no	no	no
max. dimension [mm]	0.78	4.2	3.37	-	0.82

Obr. 3 Prehľad antén v UWB frekvenčnom pásme (3,1 -10,6 GHz) [4,5]



Obr. 4 Konceptčný návrh ABSI systému

Zlepšenie vlastností a rozšírenie potenciálu RF komunikácie z pohľadu hĺbky umiestnenia ABSI systému v tkanive je všeobecne možné tromi spôsobmi:

1. zvýšením výkonu akceptovaného anténou
2. znížením pracovnej frekvencie
3. zvýšením zisku antény

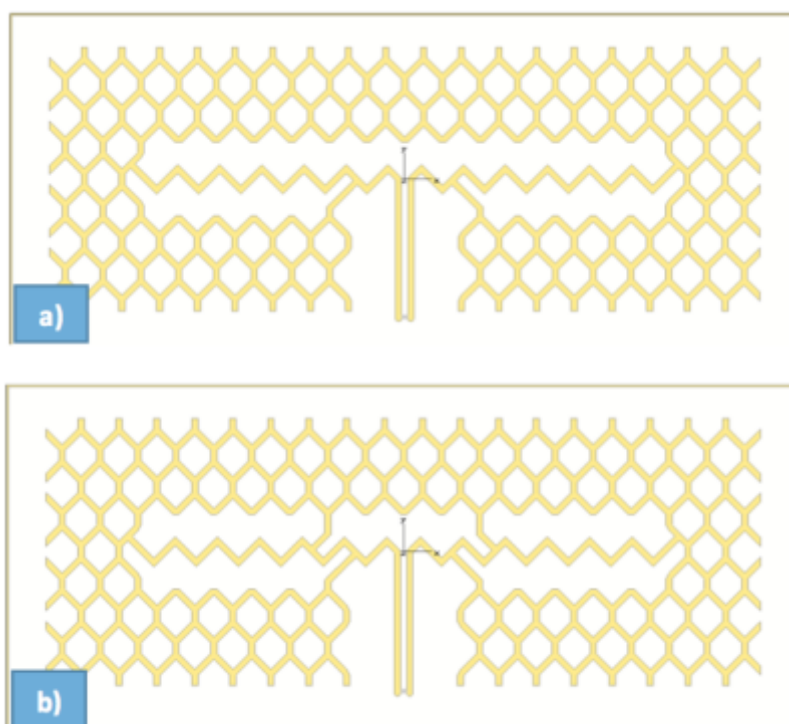
Prvý spôsob je v rozpore s požiadavkami kladenými na ABSI. Druhý spôsob vedie k zníženiu útlmu elektromagnetickej vlny v ľudskom tkanive a tradične vedie k väčším rozmerom antén z dôvodu zachovania radiačnej schopnosti (zisku), čo má negatívny dopad na celkové rozmery ABSI a teda je kontraproduktívne vzhľadom na úmysel integrácie antény na čip. Optimálnym riešením je posledná možnosť, čo znamená najstť buď inovatívnu štruktúru a usporiadanie antény alebo nový princíp zvýšenia zisku antény bez významného zväčšovania rozmerov systému. Jeden z možných prístupov je použitie tzv. prispôsobovacej (dielektrickej) vrstvy (PDV), pričom len samotný prístup dokáže významným spôsobom prispieť k zvýšeniu vyžarovacej účinnosti antény realizovanej na čipe. Prvotné simulácie neoptimalizovaných štandardných antén vykazujú možné zlepšenie radiačnej účinnosti aj viac ako o 20 dB [6]. Stručný principiálny opis úplne nového konceptu ABSI je bližšie opísaný v nasledujúcej časti.

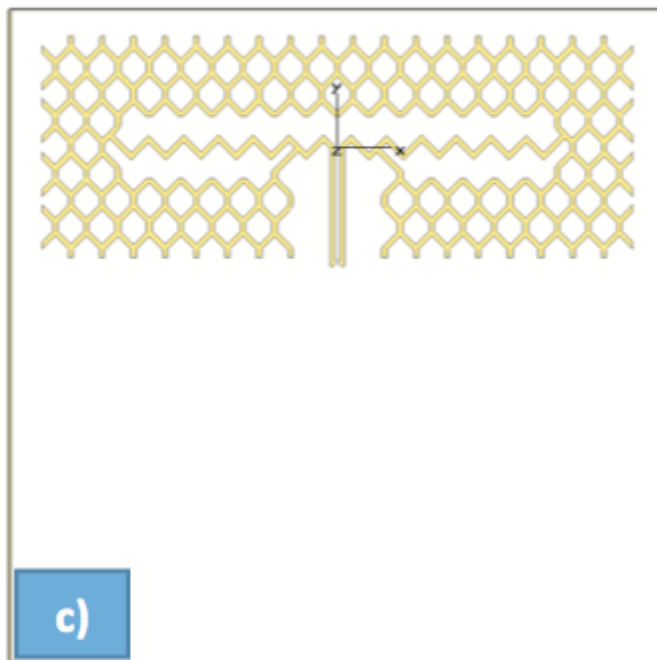
3. Integrácia UWB antény na čip

Návrh antény na čipe realizovaný v štandardnej CMOS technológii sa v mnohých aspektoch líši od návrhu diskkrétnej antény v dôsledku existencie mnohých parazitných javov - nízky merný odpor samotného substrátu, malá vzdialenosť medzi najvyššou metalizačnou úrovňou a substrátom (cca 10-15 μm), malá efektívna dĺžka antén realizovaných na čipe v porovnaní s ich pracovnou frekvenciou, atď. Spomínané javy negatívnym spôsobom ovplyvňujú výslednú radiačnú účinnosť integrovaných antén. Efektívnejší návrh antény v CMOS procese je až pre vyššie frekvencie t. j. minimálne desiatky GHz. Radiačná účinnosť i pri takto vysokých frekvenciách však závisí od konfigurácie systému a môže byť zvýšená pomocou optimalizačných techník akými sú za členenie tieniacej vrstvy medzi anténu a vonkajší povrch substrátu, použitie zložitejších štruktúr antén, použitie superstrátovej konfigurácie alebo tvarovacej

šošovky a pod. [5].

Z uvedeného vyplýva pohľadávka po inovatívnom riešení, ktorého princíp je schematicky znázornený na Obr.4. Centrálna plocha je okupovaná samotným čipom, ktorý je fyzicky rozdelený na dve hlavné časti (aktívnu a pasívnu) z dôvodu potlačenia vzájomnej elektromagnetickej interferencie medzi elektronickým systémom (aktívna časť) a anténou (pasívna časť). Holý čip je následne obalený nízkostratovým izolátorom – PDV vrstvou s vysokou relatívnou permitivitou ϵ_r (cca 40-60 v závislosti od typu mäkkého tkaniva a požiadaviek uvedených v [7]). PDV vrstva súčasne vytvára hermeticky uzavreté puzdro čipu. Poznamenajme ešte, že fyzické rozdelenie čipu na aktívnu a pasívnu časť nám neskôr v procese puzdrenia umožní vytvoriť v puzdre dutinu, a tým zjednodušiť kontaktovanie aktívnej časti čipu. Vzhľadom na to, že existuje predpoklad priameho kontaktu PDV s hostiteľským prostredím je dôležité aby PDV bezpodmienečne spĺňala požiadavky na biokompatibilitu a biostabilitu. Takto zapuzdrený čip sa následne stáva súčasťou živého tkaniva.



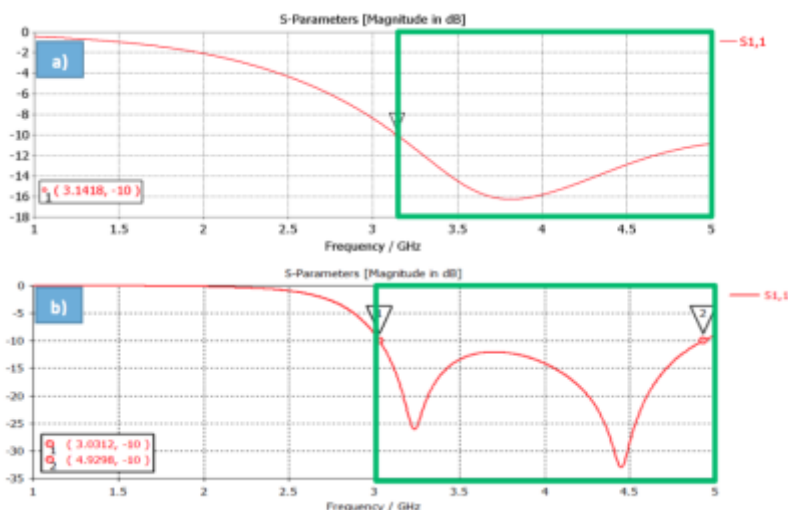


Obr. 5 Štruktúra analyzovaných antén

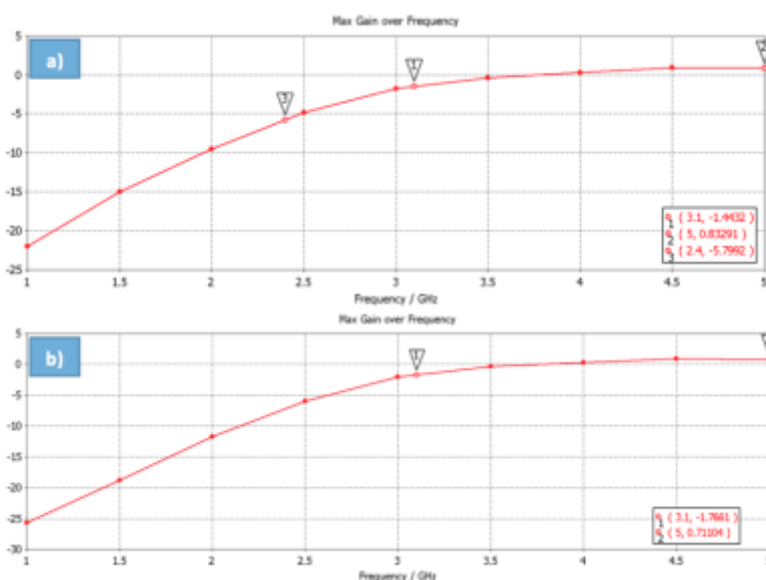
*a) Návrh pre konvenčný prístup b) Návrh pre aplikačne špecifický prístup c)
Umiestnenie antény na čipe.*

Obr. 5 zobrazuje navrhnuté riešenia antén realizovaných na čipe podľa predstaveného konceptu (Obr.4) pre UWB komunikáciu t.j. frekvenčné pásmo 3,1 – 5,0 GHz. Prezentované antény však ešte stále nepredstavujú konečné a optimálne riešenie (problematická stabilizácia zisku, anténa b) vykazuje veľmi nízku hodnotu vstupného odporu na 2,4 GHz a otázna je tiež ich fyzická realizovateľnosť, nakoľko topografia je striktne definovaná návrhovými pravidlami zvolenej technológie atď.). Navrhnuté antény ale disponujú elektrickými vlastnosťami, ktoré sa už približujú k požadovaným prioritným vlastnostiam t.j. priestorová náročnosť, frekvenčný rozsah a prispôbenie antén (Obr. 6), maximalizácia zisku a účinnosti antén (Obr. 7 v porovnaní s Obr.3).

Poznamenajme, že na týchto obrázkoch sú dva typy antén - anténa navrhnutá pre konvenčný prístup (50 Ω) a anténa navrhnutá pre tzv. aplikačne špecifický prístup, ktorý vychádza z poznatku, že vstupná/výstupná impedancia elektrických obvodov realizovaných na čipe ma prirodzene kapacitný charakter. V našom prípade je anténa v prípade b) prispôbena na impedanciu prislúchajúci odporu s hodnotou 30 Ω a kapacite 0,8 pF. Pre úplnosť ešte dodajme, že simulácie boli realizované v CST Microwave Studio 2015, pričom model 90 nm TSMC CMOS technológie bol zostavený na základe jeho PDK a relatívna permitivita PDV vrstvy ϵ_r mala hodnotu 50 (imitácia umiestnenia ABSI v svalovine).



Obr. 6 Spätné straty - S11 parameter: a) Návrh pre konvenčný prístup b) Návrh pre aplikačne špecifický prístup.



Obr. 7 Maximálny zisk antén (bez spätných strát): a) Návrh pre konvenčný prístup b) Návrh pre aplikačne špecifický prístup.

4. Záver

Implantovateľné medicínske zariadenia sú v dnešnej dobe už neoddeliteľnou súčasťou zdravotníckej starostlivosti a zvyšovania kvality života pacientov. Patria tu zariadenia od bežných pasívnych protéz (telesných náhrad) až po sofistikované aktívne medicínske zariadenia - napríklad ABSI, ktoré sú v súčasnosti na „vyššej“ úrovni pod intenzívnym drobnohľadom biokybernetiky. Netreba však zabúdať ani na „nižšie úrovne“, ktoré zahŕňajú napríklad samotnú fyzickú realizáciu jednotlivých subsystémov. Jeden takýto subsystém (nízkopríkonový komunikačný modul) je predmetom výskumu, ktorého čiastkové výsledky boli predstavené v rámci tohto článku. Prioritou výskumu je energetická náročnosť a najmä veľkosť (rozmery) modulu. Súčasťou príspevku bolo taktiež prezentovať úplne nový koncept (navrhnutý vedeckým tímom z Ústavu elektroniky a fotoniky, FEI STU v Bratislave), ktorý by umožnil integrovať anténu pre ABSI so strednou hĺbkou implantácie spolu so zvyškom systému na spoločnom čipe. Počiatočná analýza a numerické simulácie ukazujú, že Dávid by naozaj dokázal poraziť Goliáša.

Podakovanie

Príspevok vznikol s podporou projektu „Centrum výskumu závažných ochorení a ich komplikácií“ ITMS 26240120038.

Literatúra

1. G.E. Santagati and T. Melodia. Sonar inside your body: Prototyping ultrasonic intrabody sensor networks. In INFOCOM, 2014 Proceedings IEEE, pages 2679-2687, April 2014
2. Asimina Kiourti, Konstantinos A. Psathas, and Konstantina S. Nikita. Implantable and ingestible medical devices with wireless telemetry functionalities: A review of current status and challenges. Bioelectromagnetics, 35(1):1-15, 2014.
3. Inc. St. Jude Medical. Nanostim leadless pacemaker. Technical report, 2015.
<http://professional-intl.sjm.com/products/crm/leadless-pacemakers/dual-and-single-chamber/nanostim#tech-specs>
4. M. Kováč, V. Stopjaková, G. Nagy, and D. Arbet: Investigation of UWB Antenna On-chip Integration in CMOS Process towards Energy autonomous Implantable Biosensors. Proceedings of International Conference on Mobile and Information Technologies in Medicine and Health 2014, 2014
5. H.M. Cheema and A. Shamim. The last barrier: on-chip antennas. Microwave Magazine, IEEE, 14 (1):79-91, Jan 2013
6. M. Kováč, V. Stopjaková, D. Arbet, and G. Nagy, Gabriel: Novel approach to gain enhancement of an antenna integrated in 90 nm CMOS process. In ADEPT 2015 : 3rd international conference on advances in electronic and photonic technologies. Štrbské Pleso, High Tatras, Slovakia. June 1-4, 2015. 1. vyd. Žilina : University of Žilina, 2015, S. 128-131. ISBN 978-80-554-1033-3
7. M. Kováč, V. Stopjaková: Energetická autonómnosť implantovateľných senzorických uzlov. In Počítačové architektury a diagnostika PAD 2015 : Česko-slovenský seminár pro studenty doktorského studia. Zlín, Česká Republika. 2.-4. 9. 2015. Zlín: UTB ve Zlíně, 2015, S. 54-59. ISBN 978-80-7454-522-1.

Spoluautorom článku je prof. Ing. Viera Stopjaková, PhD., Ústav elektroniky a fotoniky, Fakulta informatiky a informačných technológií
