Стручни критички осврт

Tijana Ž. Dimitrijević, *Razvoj i primena kompaktnog žičanog TLM modela za efikasnije projektovanje i analizu mikrotalasnih struktura cilindrične geometrije*. Докторска дисертација. Ниш: Електронски факултет Универзитета у Нишу, 2014, 191 стр. основног текста; литература стр. 192–199; биографија и три прилога (изјаве) на крају. Ментор проф. др Небојша Дончов; Комисија за оцену и одбрану: Н. Дончов, В. Марковић, Б. Колунџија (Електротехнички факултет Универзитета у Београду), О. Пронић-Ранчић, Н. Малеш-Илић. Национални репозиторијум дисертација у Србији (НаРДуС).

I Предмет, грађа и мерило

Дисертација узима за предмет један добро одабран методолошки процеп нумеричке електромагнетике. Метод моделовања преносним водовима (TLM) развијен је и уграђен у комерцијалне тродимензионалне симулаторе претежно у правоугаоном координатном систему, где се кружне и цилиндричне површи описују степенастом (stair-case) апроксимацијом. Кад се структура кружног пресека моделује с реалном жичаном побудом (сондом), сустичу се два супротна захтева, које рад именује прецизно: „primena žičanog modela u pravougaonoj TLM mreži iziskuje kompromis između dva međusobno suprotna zahteva“ (стр. 4) — финија мрежа за верно описивање обода наспрам минималне димензије ћелије коју тражи компактни жичани модел. Одатле следи замисао рада: развити и софтверски имплементирати компактни жичани модел у TLM метод у цилиндричном координатном систему (програм 3DTLMcyl_cw, FORTRAN 77), с посебним алгоритмом повезивања жичаних сегмената кроз ћелије променљивог попречног пресека, па метод верификовати на цилиндричним резонаторима и кружним микрострип антенама с коаксијалном побудом.

Пре свега другог ваља изрећи мерило, изричито и без изузетка. Рукопис је пред комисијом био у децембру 2014, а најкасније 18. децембра 2014, на дан именовања Комисије за оцену и одбрану (одлука Наставно-научног већа бр. 07/03-035/14-004 од 18. децембра 2014; извештај комисије примљен је на Факултету 3. фебруара 2015). Као крајња граница узима се стога децембар 2014: рад се овде мери искључиво према литератури, стандардима, прописима и стању знања који су тада постојали и били доступни; ништа што је настало касније није мерило. То правило важи и за списак литературе овог осврта — свака његова јединица објављена је пре тог рока, изузев саме дисертације, извештаја комисије и извора за чињенице које се временом не мењају (уз назнаку издања).

Наводи из дисертације преносе се дословно, у наводницима, у писму у коме је рад написан (латиница), с бројем према штампаној пагинацији. Још једно одређење обликује како се чита методолошки слој: рад не поставља формалне хипотезе, него у уводу (1.2) даје два задатка — развој и имплементацију модела, те његову верификацију и испитивање примене. Такав, пројектно-верификациони нацрт легитиман је истраживачки регистар, па се строго мерило доказане или оповргнуте хипотезе на њега не сме применити механички; али не штити рад од захтева да оно што тврди буде тачно, доследно спроведено и, где се тврди мера, измерено.

II Шта рад доноси

Осврт је дужан да почне оним што дисертација јесте, јер је то и највећи део онога што она вреди.

Прво и најважније, рад доноси самосталан методолошки допринос: прилагођење компактног жичаног модела цилиндричној мрежи и, у оквиру тога, посебан алгоритам повезивања жичаних чворова кроз ћелије чији се попречни пресек мења дуж радијалног правца. То место рад изводи и означава као сопствено: „što zahteva primenu dodatnog algoritma povezivanja žičanih čvorova sa različitim admitansama vodova“ (стр. 63). Уз њега иде и софтверска реализација — програм 3DTLMcyl_cw, за који рад тачно наводи окружење: „Za realizaciju programa 3DTLMcyl_cw, zasnovanog na integralnom cilindričnom TLM metodu prezentovanog u disertaciji, korišćen je programski jezik FORTRAN77.“ (стр. 65). Разграничење према постојећем солверу Лабораторије изведено је поштено: тај солвер, наводи рад, имао је „nedostatak ovog solvera je nemogućnost pobuđivanja polja na drugi način osim primenom Dirac-ovog impulsa i zanemarivanje uticaja žičanih elemenata“ (стр. 11), па је читаоцу јасно шта је наслеђено, а шта додато.

Друго, рад квантификује своју централну предност тамо где је најубедљивија. За празан цилиндрични резонатор показује да иста тачност (одступања реда неколико мегахерца од аналитике) следи из осетно мањег модела: „cilindrična mreža (φ×r×z) = (36×14×32) (16.128 čvorova) obezbeđuje zadovoljavajuću tačnost rezultata“ (стр. 89) наспрам најмање упоредиве правоугаоне мреже од 59.168 чворова. Уз то, предност у полупречнику жичане сонде није само тврђена него и демонстрирана: „predloženi model implementacije žičanog modela u cilindričnoj TLM mreži omogućava modelovanje žičanih sondi značajno većeg poluprečnika u poređenju sa žičanim modelom implementiranog u pravougaonu TLM mrežu“ (стр. 105) — с бројчаним поређењем (правоугаона мрежа ограничена на 1,0 mm, цилиндрична до 2,6 mm при дужини сонде од 1 cm).

Треће, најснажнији резултат целог рада је онај у коме конкурентни приступ објективно отказује: за коаксијално оптерећење водом велике пермитивности, „TLM metodom u pravougaonim koordinatama nije bilo moguće modelovati rezonator sa vodom kao koaksijalnim opterećenjem i sondama datih dimenzija“ (стр. 117), јер корак правоугаоне мреже у диелектрику постаје мањи од полупречника жице, док цилиндрична мрежа рефинира само радијални правац. То није квалитативна оцена него бројчано заснован аргумент, поткрепљен и запажањем да „rezolucija mreže u dielektriku, koja je određena relativnom permitivnošću dielektrika, nema uticaja na mogućnost modelovanja žičane sonde i ograničavanje njenog poluprečnika“ (стр. 121).

Четврто, рад укључивањем реалне сонде у модел добија информацију коју импулсна побуда не даје: „numeričkim putem dobijene vrednosti pokazuju uticaj sondi na promenu rezonantnih frekvencija uspostavljenih modova“ (стр. 101), што омогућава реалистичнију идентификацију побуђених модова и поређење с мерењем.

Пето, рад је ослоњен на вишеструку верификацију — аналитичко решење празног резонатора, поређење с TLM приступом у правоугаоним координатама, апроксимативни cavity model (сопствени MATLAB код) и мерења: резонатори у Лабораторији за микроталасну технику и бежичне комуникације ЕФ Ниш, антене у RF and Microwave Research Laboratory Техничког универзитета у Илменау. Скуп антенских конфигурација (класична кружна patch антена, с ваздушним процепом, инвертована, инвертована с металним оклопом, patch-ring, open-ring-slot) представља употребљив пресек практично важних структура.

Најзад, ваља поштено рећи и оно што надилази појединачне вредности: тврдње рада у највећем делу су сагласне с аналитиком и међусобно доследне. Изводи S параметара и улазне импедансе преко жичаног порта интерно су доследни; аналитичке вредности резонантних фреквенција у табелама рачунате су исправном конвенцијом; изрази cavity модела (директивност, Q фактор, улазна импеданса) сагласни су са стандардном теоријом. Та поузданост фактографске основе није споредна: она омогућава да се о раду расправља овако детаљно.

III Циљ и метод

Пошто рад не поставља хипотезе, тежиште методолошке оцене је на томе да ли су два задатка операбилна и како је показано да су испуњена. Први задатак (развој и имплементација) операбилан је и очигледно испуњен: постоји код који даје одзив, S параметре и улазну импедансу, а алгоритам је описан у поглављима 2.3 и 2.4. Други задатак (верификација) испуњен је, али само делимично формализован, и ту је језгро методолошке замерке.

Критеријум слагања није доследно квантификован. За аналитичко поређење рад декларише бројчани праг (одступање резонантне фреквенције испод 5 MHz), али је велик део поређења с правоугаоном мрежом и с мерењем изражен само квалификативима — одлично, веома добро, изузетно добро — без придружене мере одступања и без именованог прага прихватљивости. Овде мерило треба поставити прецизно. Валидација нумеричког електромагнетског модела поређењем с мерењем и с алтернативним кодом сама по себи је легитиман поступак: IEEE Std 1597.1-2008 управо тако дефинише валидацију резултата (поређење са скупом добијеним мерењем, алтернативним кодом или аналитички), па избор верификације мерењем није мана. Спорно је изостало квантификовање: квантитативни дескриптори слагања били су разрађени и доступни пре рока — метода Feature Selective Validation (Duffy и др., 2006) придружује баш тим квалификативима бројчане опсеге и поступак рачунања (ADM/FDM/GDM). Изостанак бројчане мере уз графичка поређења стога је стварна, иако блага, методолошка празнина, а не пуки стилски пропуст; за примере с реперним величинама (резонантна фреквенција, магнитуда S11, KST) бројке ипак постоје у табелама, па се слагање тамо види квантитативно.

Мерни поступак за резонаторе документован је потпуно — опрема и калибрација рефлексије (SHORT/OPEN) и трансмисије (THRU), што одговара пракси описаној у упутству произвођача за векторску анализу мрежа (Agilent, App. Note 1287-3, 2002) — и тај део верификације је поновљив. За антене (Илменау), међутим, инструмент није именован, а мерна несигурност није наведена. Ту меродаван писани извор постоји: JCGM 100:2008 (GUM), т. 0.1, изричито тражи да се уз мерни резултат да неки бројчани показатељ квалитета резултата, без кога се резултати не могу поредити ни међусобно ни с вредностима из спецификације. Изостанак исказане несигурности за антенски сегмент стога је реална, али блага методолошка мана; овде се не узима за тежак пропуст, иако би — будући да мерене вредности служе као референца — њено исказивање било пожељно.

Најслабија методолошка тачка тиче се речи из наслова — „efikasnije“. Тврдња о временској ефикасности изведена је, а не измерена: „nameće se zaključak da je integralni cilindrični TLM metod efikasniji, u pogledu potrebnog vremena i računarskih resursa, u odnosu na pristup u pravougaonim koordinatama“ (стр. 183). Ресурсна страна (меморија, сразмерна броју чворова) јесте показана бројчано, а закључак о времену честито је ограђен формулацијом „nameće se zaključak“ и логички је бранљив (мањи број ћелија и временски корак повлаче мање итерација); али измерено време симулације у раду не постоји, а сама глава 3 значај трајања ублажава: „duže trajanje simulacije, što nije nužno značajan problem, imajući u vidu brzine sadašnjih procesora“ (стр. 90). Тврдња о временској ефикасности остаје, дакле, изведена, не измерена — што при евентуалном монографском издању треба или измерити или формулисати уздржаније.

Емпиријски коефицијенти жичаног модела (фактори еквивалентног полупречника, kCi и kLi = 0,34) преузети су из калибрационог поступка на правоугаоном моделу коаксијалног вода и примењени на цилиндричне ћелије променљивог пресека без издвојене ревалидације у цилиндричној геометрији; њихова ваљаност поткрепљена је посредно, слагањем крајњих резултата у главама 3 и 4. С обзиром на то да рад изричито наводи емпиријску природу модела, то је прихватљиво, али би засебна провера коефицијената ојачала аргумент.

IV TLM метод у цилиндричним координатама и компактни жичани модел

Теоријски део (поглавље 2) претежно је систематично изложена, уредно цитирана позната теорија — генерални и хибридни симетрични кондензовани чвор, процедуре расејања и повезивања, граничне површи и побуда — на темељу примарне литературе (Christopoulos, *The Transmission-Line Modeling Method: TLM*, 1995, и сродни радови). Извођења су интерно доследна, а сопствени допринос (алгоритам повезивања за променљив попречни пресек и прилагођење параметара жичане мреже) јасно је издвојен и означен без позивања на туђи извор.

У том делу остаје неколико места која треба исправити, ниједно тежине која би дирала носеће резултате. У опису хибридног чвора II типа поткрала се замена речи: услов једнакости адмитанси вода описан је као да се односи на „admitanse vodova, koji modeluju istu komponentu magnetnog polja“ (стр. 32), док непосредно раније, на суседном месту, стоји тачна дефиниција да „vodovi, koji modeluju različite komponente električnog polja, mogu imati različite karakteristične impedanse“ (стр. 31); реч „magnetnog“ треба да гласи „električnog“, што потврђује и структура одговарајуће једначине изражене преко адмитанси. Грешка је концептуална у дефиниционој реченици, али без последица по резултате, јер су сви резонатори и антене моделовани хибридним чвором I типа. Слична је по природи неусклађеност у броју водова: за исти чвор на једном месту стоји „mrežu 6 vodova, čije tačke preseka obrazuju čvor“ (стр. 13), а на другом „Prikazani čvor se sastoji iz dvanaest portova, 12 vodova“ (стр. 22); прва бројка разложно се чита као шест водних праваца (сваки с две поларизације), али текст ту није уједначен, док сва извођења и матрица расејања доследно користе дванаест. Ту је и упут на непостојећу једначину „(1.137)“ на страни 50 — очигледна штампарска грешка уместо „(2.137)“, будући да поглавље 1 нема нумерисаних једначина, а граничне површи описују једначине опсега (2.136)–(2.138); контекст је недвосмислен, али упут отежава праћење.

У нотацији један множитељ у изразима компоненти поља записан је као збир квадрата правоугаоних таласних бројева уместо квадрата радијалног таласног броја; како су те две величине бројчано једнаке, израз остаје тачан, али ознаке потичу из претходног правоугаоног извода и нису уведене у цилиндричној анализи, па их

треба заменити. Напокон, писање страних имена и сложеница није уједначено (наспрам доследног склањања с цртицом — „Maxwell-ovih“, „Thevenin-ovog“ — стоје облици попут „kratkospojenih“ и „kratko-spojenih“); по важећем Правопису српскога језика (Пешикан, Јерковић и Пижурица, 2010) склањање изворно писаних имена с падежном цртицом није грешка, али је недоследност (исти појам писан на два начина) правописна мана коју лектура треба отклонити.

V Софтверска имплементација и верификација

Одељак о софтверу (2.4) даје структуру улазне датотеке, осмокорачни алгоритам и носеће једначине прорачуна S параметара и улазне импедансе, што омогућава праћење тока прорачуна и реимплементацију. Изводи тог дела међусобно су сагласни — то је вредност дела.

Две методолошке празнине треба именовати. Прва је поновљивост: изворни код и улазне датотеке програма 3DTLMcyl_cw нису приложени, нити је наведена верзија превода, што ограничава дословну поновљивост. Рад то и не крије, признајући да „postoji čitav niz oblasti gde primena ovog paketa nije još uvek adekvatna bez izvesnih korekcija i dogradnji“ (стр. 67); пошто су алгоритам и структура улаза описани, овде се то не узима за озбиљнуману, али би приложен код или бар потпунији опис улаза учинили верификациони део проверљивим у пуном обиму. Друга је већ поменути изостанак квантификоване мере слагања и мерне несигурности (в. одељак III), који се на антенском сегменту мери према GUM-у (JCGM 100:2008).

О садржинској страни верификације сведочи и то што је бројчани праг за аналитичко поређење (одступање испод 5 MHz) прекршен у једном од пет приказаних модова празног резонатора (мод TM011 одступа око 10 MHz, ~0,5%); суштинска тврдња о доброј сагласности стоји, али би прецизнија формулација говорила о одступањима реда неколико мегахерца (до ~10 MHz). Веће одступање правоугаоне мреже за поједине више модове није ту слабост — оно је, напротив, поента рада (предност цилиндричне мреже).

VI Цилиндрични резонатори без оптерећења и с оптерећењем

Ово поглавље носи најубедљивије резултате рада (в. одељак II) и, уз њих, неколико стварних, али лаких недостатака.

Најозбиљнији садржински налаз тиче се пренете уџбеничке теорије резонатора. У симболичким дефиницијама и фреквенцијским изразима замењени су типови нула Беселове функције између модова: за TE мод ознака је описана као „n-ti koren Bessel-ove funkcije prve vrste, reda m.“ (стр. 81), а за TM мод као „n-ti koren izvoda Bessel-ove funkcije prve vrste reda m.“ (стр. 82) — обрнуто од стандардне теорије и од сопствених

једначина поља у истом делу (гранични услов за TE мод захтева нулу извода, а за TM мод нулу саме функције). Реч је о транскрипционој грешци пренете теорије из извора [3] (Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, 1989). Ваља, међутим, одмах додати оно што рад брани: нумеричке вредности у табелама рачунате су исправном конвенцијом (нпр. TE111 = 1,638 GHz одговара нули извода 1,8412), па резултати и закључци нису погођени, а у cavity моделу антене (магнетни бочни зид) иста ауторка исправно користи нуле извода — знак да је конвенција позната. Ознаке у тексту, ипак, треба исправити.

Из истог круга су ситне унутрашње недоследности које треба отклонити: иста импулсна вредност (3,397 GHz) означена је у једној табели као мод TE113, а у другој као TM112, при чему из аналитичких вредности следи да припада моду TE113, па идентификацију два блиска мода у истом опсегу треба разрешити засебним приказом; наведени униформни корак правоугаоне мреже (0,33 cm) не слаже се с висином резонатора при 32 чвора по оси z (где је стварни корак 0,445 cm), што је словна омашка која отежава реконструкцију правоугаоног модела, док укупан број чворова и поређење остају ваљани; напокон, две различите табеле носе исту ознаку „3.3“, па једну треба преозначити.

Оцене слагања с мерењем дате су квалитативно („веома добро“) без бројчане мере, при чему највеће одступање иде до ~50 MHz (~1,6%, мод TE311 са две сонде). Ту важи мерило из одељка III: слагање по положају резонанси и по тренду померања услед сонде стварно је потврђено, али би прецизнија формулација навела максимално или средње одступање у процентима. Тврдња да радијалне сонде под произвољним углом чине правоугаони приступ практично неизводљивим дата је без приказаног правоугаоног поређења баш за тај пример; тврдња је, међутим, геометријски очигледна последица природе правоугаоне решетке (коси сегмент захтева степенасту апроксимацију, супротну услову компактног жичаног модела), а предност цилиндричне мреже за жичане сонде рад је квантитативно демонстрирао на другом примеру (максимални полупречник сонде). За планпаралелно оптерећење рад не преувеличава: пошто су обе мреже упоредиве (уз „postignuto je izuzetno dobro slaganje karakteristika dobijenih primenom pravougaone i cilindrične TLM mreže“, стр. 111), предност цилиндричне мреже поштено је сведена на то да се „prednost integralnog cilindričnog metoda se ogleda u korišćenju mreže sa manjim brojem čvorova i većem stepenu slobode u pogledu izbora poluprečnika sonde“ (стр. 111). Осцилације у трансмисији рад сам приписује претпоставци о беспатним зидовима и одсецању у временском домену — још један знак трезвеног односа према сопственим резултатима.

VII Кружне микрострип антене и закључак

Теоријски део о cavity моделу (4.1) готово је у целини преузета, коректно изведена и уредно цитирана позната теорија; сопствени садржај тог дела је MATLAB имплементација као независни аналитички ослонац за поређење с TLM-ом. Апликативни део (4.2) спроводи верификацију на низу антенских конфигурација с мерном потврдом и поштено приказује границе апроксимативног модела.

У преузетој теорији остала су три међукорачна недостатка, сва без последица по резултате јер радне формуле које се стварно користе нису погођене. Општи израз резонантне фреквенције (4.18) носи сувишан фактор брзине светлости и димензионо је сагласан само ако се исти симбол пермитивности и пермеабилности чита као релативан (док је у претходном изразу апсолутан) — иста ознака у два значења; радна формула (4.19), једина коришћена у прорачуну, димензионо је исправна. У дефиницији површинске отпорности уз (4.48) специфична проводност стоји у бројиоцу, чиме тај облик заправо даје реципрочну дубину продирања, а не површинску отпорност; изведени Q фактор проводних губитака и апроксимација за снагу губитака имају проводност на исправном месту, па грешка не пропагира. Најзад, у прелому једног облика компоненте магнетног поља изостао је фактор кружне учестаности у имениоцу, док је облик преко потенцијалне амплитуде тачан. Сва три места су транскрипционе или преломне омашке у пренетој теорији (мерене према стандардној литератури — Balanis, 1989; Garg и др., *Microstrip Antenna Design Handbook*, 2001) и треба их исправити ради проверљивости порекла израза.

Уз то иду ситнији недостаци апарата и језика у истом делу: у заглављу једне табеле ознака мода „0,2“ јавља се двапут (друга треба да гласи „0,3“), при чему су вредности корена тачне; уз Гухину модификацију откуцана је погрешна референца [72] (рад Wolff-a и Knoppik-a о динамичкој диелектричној константи) уместо [71] (Гуха), што је недвосмислено из истог пасуса; наведена резонантна дужина патч антене „oko 0.25λ0“ при доњој је граници опсега λ0/3–λ0/2 из приручничке литературе и најбоље се разуме као физичка дужина полуталасног патча на супстрату веће пермитивности; израз да „moduo koeficijenta refleksije iznosi najmanje 10 dB“ језичка је скраћеница за слабљење рефлексије (|S11| ≤ −10 dB), јер је сам модул коефицијента рефлексије бездимензиона величина; а тврдња да је „od svih metoda pobuđivanja koaksijalno pobuđivanje je najefikasniji“ (стр. 127) слободније је препричавање својства које извор [2] исказује као мало нежељено зрачење феда — језгро је верно, али су суперлатив и појам бочних листова непрецизан пренос. Терминолошки, инструмент за мерење магнитуде и аргумента S11 назван је непрецизно: „magnituda i faza S11 parametra fabrikovane antene izmereni su pomoću vektorskog analizatora spektra“ (стр. 153) — реч је о векторском анализатору мрежа, једином који мери и магнитуду и аргумент; да ауторка разликује инструменте, види се из поглавља 3, где је опрема именована исправно.

Носеће тврдње апликативног дела поткрепљене су табелама, уз једну доследно поштену меру опреза. Тврдња да „rezultat dobijen 3DTLMcyl_cw softverom pokazuje najbolje slaganje sa merenim vrednostima“ (стр. 157) важи недвосмислено за резонантну фреквенцију и KST, а за магнитуду S11 правоугаони резултат је занемарљиво ближи (~0,05 dB, унутар резолуције очитавања); тврдња стога стоји у целини, уз напомену да S11 није величина по којој цилиндрична мрежа предњачи. У једној табели очитани S11 и KST међусобно нису потпуно сагласни за cavity и правоугаони ред (највише за cavity), јер су очитани с двеју кривих у близини заравњеног минимума; вредности за цилиндрични солвер међусобно су сагласне и закључак остаје непромењен. За инвертовану антену на FR4 подлози мерена резонантна фреквенција ближа је правоугаоном него цилиндричном резултату — што ауторка коректно не увеличава, будући да на том месту не тврди примат цилиндричне мреже за резонантну фреквенцију. Тврдња да се металним оклопом постиже „smanjenje dimenzija antena do 30%“ (стр. 169) исправно је приписана извору [83] и опрезно ограђена речју „до“; наведено одступање cavity модела за једну подлогу (2,9%) незнатно одступа од вредности која следи из заокругљених бројева у табели (3,0%), што је последица заокругљивања.

Ефикасност се и у овом делу аргументује бројем чворова изведеним из наведених резолуција (мреже су дате као број чворова по осама, одакле однос од око 6,7 пута непосредно следи), али без директно измерене меморије и времена. Уопштавање с приказаног скупа од шест конфигурација на класу микрострип антена и на поуздан алат и високу тачност — рад изричито каже да се „može smatrati pouzdanim alatom i u slučaju rešavanja problema elektromagnetnog prostiranja kod mikrostrip antena“ (стр. 186) — подупрто је приказаним примерима, али је изречено нешто одлучније него што ширина узорка носи. Ту треба ценити сопствену меру опреза ауторке: у самом закључку верификација је сведена на „na gotovo svim primerima koji su bili predmet istraživanja“ (стр. 190), чиме се признаје да поједине конфигурације (инвертована с оклопом, open-ring-slot) нису мерене, него поређене само нумерички: за њих важи оцена да „Grafici pokazuju veoma dobro slaganje rezultata postignutih primenom TLM metoda u cilindričnom koordinatnom sistemu sa TLM rezultatima baziranim na pravougaonoj mreži“ (стр. 170). Утолико је шира формулација на другом месту — „U svim razmatranim primerima modelovanja patch antena postignuto je veoma dobro slaganje numeričkih TLM rezultata sa odgovarajućim rezultatima dobijenim na osnovu eksperimentalnih modela antena“ (стр. 186) — преопштена, а прецизнија је баш ауторкина сопствена са стране 190.

Посебно ваља истаћи интелектуалну поштеност закључка. Рад отворено наводи ограничење цилиндричне мреже да не допушта жичани елемент у самом центру антене: „Ovo je jedan od bitnih nedostataka TLM solvera u cilindričnom koordinatnom sistemu, koji se može prevazići implementacijom tzv. centralnog čvora“ (стр. 176), уз проверу да померање побуде за 1,5 mm нема значајнији утицај на S11. Уз то,

поглавље 5.2 набраја три ограничења метода, међу њима и „ograničeno proširenje modelovanog prostora zbog velikih dimenzija ćelija na obodu“ (стр. 189), и повезује их с правцима будућег рада. Рад изричито изједначава појмове TLM чвор и TLM ћелија: „Osnovna TLM ćelija, kojom se opisuje prostiranje impulsa u delu prostora, predstavlja čvor sačinjen od šest međusobno ukrštenih transmisionih linija.“ (стр. 187). Понављање списка доприноса (резиме, увод, 5.3) очекивана је форма закључног поглавља и не узима се заману.

VIII Једначине, слике, табеле, бројеви и језик

Технички слој рада поуздан је: аналитичке фреквенције, изрази cavity модела и изводи S параметара сагласни су са стандардном теоријом и међусобно. Замерке у овом делу тичу се преноса и записа, не садржине.

Словне грешке су присутне, али лаке и без утицаја на смисао: име Fourier писано је погрешно на више места („Furrier“, „Fourrier“) наспрам исправног облика другде; назив програма откуцан је као „3DTLMyl_cw“ уместо 3DTLMcyl_cw; ту су и „rafleksije“, „Rezonanta“, „Pointing“ уместо „Poynting“, „dominatnog“, „ložaja“, „mirkostrip“, „pobošanja“, „dilektrika“ и апсцисни натпис „Frekvenoija“. По Правопису српскога језика (Пешикан, Јерковић и Пижурица, 2010) те омашке и недоследно писање истих имена треба лекторски уједначити.

На неколико слика треба исправити обележавање: на дијаграмима рефлексионе карактеристике ордината је означена као |S21| иако натпис и садржај одговарају величини |S11|; у списку слика натписи двеју суседних слика међусобно су замењени у односу на тело рада; ознаке метода у једном заглављу изостављају префикс „3D“ који се у тексту доследно пише. Ознака „r“ преоптерећена је (полупречник сонде и полупречник диелектричног цилиндра у суседним одељцима), а разликовна ознака уводи се тек касније — контекст разрешава значење, али би доследно раздвајање било прегледније. Обим који извештај комисије наводи (199 страна, 98 слика, 7 табела, 85 библиографских јединица) одговара раду.

IX Научни апарат

Најјача тачка апарата је потпуна двострука усклађеност позивања и пописа: свих 85 јединица које се цитирају постоје у попису, а свака пописана јединица бар једном се цитира — без вишка и без мањка — уз исправан IEEE редослед нумерисања по првом појављивању и неопрекидну нумерацију слика и табела. Самоцитираност је умерена и транспарентна (десетак јединица лабораторијских радова од 85), а радови чланова комисије, изузев ментора, нису укључивани.

Формалне омашке пописа су ниске тежине и претежно потичу од извоза из програма за управљање референцама: искривљена или измешана имена аутора у неколико јединица (нпр. „S. W. Ramo, J.R; Fuzer T.V.“ уместо S. Ramo, J. R. Whinnery, T. Van Duzer, за стандардни уџбеник цитиран уз извод (3.10); окрњено или удвојено име у још неколико јединица), недоследно писање истих презимена, три чланка без потпуних података о свесци или броју, једна докторска теза без ознаке врсте рада и година једног уџбеника (Balanis, „Antenna theory“, наведено „2012“) коју треба ускладити са стварно коришћеним издањем. По општем начелу доследности и потпуности библиографске референце (ISO 690:2010) те јединице треба уредити; ниједна, међутим, не доводи у питање препознатљивост ни проверљивост извора. Материјални параметри супстрата (FR4, RO4003, RO3010) и диелектричне константе течности (етанол, вода) наведени су бројчано и сагласни су с типичним каталошким подацима.

X Однос рада и извештаја комисије

Извештај комисије верно сажима садржину и структуру рада; списак доприноса у извештају подудара се са списком у поглављу 5.3. Обим, број слика, табела и библиографских јединица које извештај наводи одговарају раду. Комисија говори о доприносима, а не о потврђеним хипотезама, што је у складу с тим што рад формалне хипотезе и не поставља.

Оцене комисије о слагању с експериментом одговарају стању у тексту (за резонаторе одлична сагласност, за антене веома добро слагање), с истом оградом коју овај осврт износи у одељку III: тврдња о ефикасности „u pogledu potrebnog vremena i računarskih resursa“ изведена је, а не поткрепљена измереним временом. Најзад, ваља приметити да и сам извештај усваја опрезну формулацију верификације — „na gotovo svim primerima koji su bili predmet istraživanja“ — што је уравнотежена оцена коју текст носи.

XI Шта остаје

Кад се све сабере, добија се оцена коју вреди изрећи у једном комаду, без ублажавања и без претеривања.

Дисертација Тијане Димитријевић солидан је и добро изведен инжењерски рад који нумеричкој електромагнетици доноси употребљив методолошки допринос: компактни жичани модел у TLM методу у цилиндричном координатном систему, с посебним алгоритмом повезивања кроз ћелије променљивог пресека и с реализованим кодом 3DTLMcyl_cw. Допринос није само тврђен него и показан тамо где је најубедљивији — код коаксијалног оптерећења велике пермитивности, где правоугаона мрежа с реалним сондама објективно отказује, и код жичаних сонди

већег полупречника и радијалних сонди под произвољним углом. Верификација је вишеструка (аналитика, правоугаони TLM, cavity model, мерења у две лабораторије), а рад је, што ваља посебно ценити, поштен према сопственим границама: набраја ограничења метода и уздржано формулише домашај верификације.

Слабости су, по оцени овог осврта, тројаке, и ниједна не руши носеће тезе. Прва се тиче транскрипционе тачности пренете теорије: замена типова нула Беселове функције између TE и TM модова у теоријском изводу резонатора и три међукорачне омашке у изразима cavity модела (сувишан фактор у општем изразу резонантне фреквенције, специфична проводност на погрешном месту у површинској отпорности, изостао фактор у једном облику компоненте магнетног поља) — све без последица по нумеричке резултате, јер радне формуле остају тачне, али све видљиве стручном читаоцу и све за исправку. Друга је квантификација верификације: слагање је на многим местима оцењено речима без бројчане мере одступања и без именованог прага, време симулације нигде није измерено, а мерна несигурност за антенски сегмент није исказана — што се мери према доступним писаним ослонцима (IEEE Std 1597.1-2008 и метода FSV за квантификовање слагања; JCGM 100:2008 за исказивање мерне несигурности). Трећа су формалне и језичке неуједначености — словне грешке, недоследне ознаке солвера и супстрата, погрешно обележене осе на двема сликама, дуплирана ознака табеле и омашке у попису литературе — ниска појединачна тежина, али збирно смањују уредност текста.

Изнад свега тога стоји једна правилност коју ваља именовати: рачун је изведен поузданије него што су местимично формулисани закључци и мере. Управо зато највећи део онога што треба поправити већ је негде у раду тачно урађено — само на погрешном месту или недоследно спроведено.

Пет измена биле би, по оцени овог осврта, најплодније у евентуалном монографском издању или наставку истраживања. Прво, исправити ознаке нула Беселове функције у теоријском изводу резонатора (TE → нуле извода, TM → нуле функције) и три међукорачне омашке у cavity моделу. Друго, уз графичка поређења навести бројчану меру одступања и именовати праг прихватљивости (по FSV/IEEE 1597.1), а за мерене резултате исказати мерну несигурност (по GUM-у). Треће, измерити време и утрошак меморије на истом рачунару и с истим критеријумом тачности, како би тврдња из наслова о ефикасности била поткрепљена бројем, а не само изведена. Четврто, разрешити недоследности у идентификацији блиских модова и у параметрима правоугаоне мреже, преозначити другу табелу „3.3“ и исправити обележавање оса и списак слика. Пето, уредити попис литературе (исправити искривљена имена аутора, годину спорног издања и непотпуне јединице) и, ако је изводљиво, приложити код и улазне датотеке ради пуне поновљивости.

Уз ту врсту редакције — која у највећем делу не тражи ново истраживање него доследно спровођење онога што је рад већ започео — ова дисертација остаје вредан и употребљив допринос нумеричком моделовању микроталасних структура цилиндричне геометрије, чији би метод и код имали шта да кажу и стручном читаоцу и пројектанту изван уже теме.

Литература

Dimitrijević, Tijana Ž., *Razvoj i primena kompaktnog žičanog TLM modela za efikasnije projektovanje i analizu mikrotalasnih struktura cilindrične geometrije* [докторска дисертација]. Електронски факултет Универзитета у Нишу, 2014. (НаРДуС, https://nardus.mpn.gov.rs/handle/123456789/7444.)

Извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације мр Тијане Димитријевић, Електронски факултет Универзитета у Нишу, примљен 3. фебруара 2015.

IEEE Std 1597.1-2008, *IEEE Standard for Validation of Computational Electromagnetics (CEM) Computer Modeling and Simulations*, IEEE, New York, 2008. DOI: 10.1109/IEEESTD.2008.4957854.

Duffy, A. P.; Martin, A. J. M.; Orlandi, A.; Antonini, G.; Benson, T. M.; Woolfson, M. S., „Feature Selective Validation (FSV) for Validation of Computational Electromagnetics (CEM). Part I — The FSV Method“, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 48(3), 2006, 449–459. DOI: 10.1109/TEMC.2006.879358.

JCGM 100:2008, *Evaluation of Measurement Data — Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM 1995 with minor corrections)*, Joint Committee for Guides in Metrology (BIPM), 2008. DOI: 10.59161/JCGM100-2008E.

Agilent Technologies, *Applying Error Correction to Network Analyzer Measurements*, Application Note 1287-3 (lit. 5965-7709E), 2002.

Balanis, C. A., *Advanced Engineering Electromagnetics*, John Wiley & Sons, New York, 1989.

Christopoulos, C., *The Transmission-Line Modeling Method: TLM*, IEEE Press / Oxford University Press, New York / Oxford, 1995. ISBN 9780780310179.

Garg, R.; Bhartia, P.; Bahl, I.; Ittipiboon, A., *Microstrip Antenna Design Handbook*, Artech House, Boston / London, 2001.

ISO 690:2010, *Information and Documentation — Guidelines for Bibliographic References and Citations to Information Resources*, ISO, Geneva, 2010.

Пешикан, М.; Јерковић, Ј.; Пижурица, М., *Правопис српскога језика*, измењено и допуњено издање, Матица српска, Нови Сад, 2010.