

## Aukštų dažnių technologija, mikrobangos T 191

## DISPERSINĖS LYGTIES SPRENDIMO BŪDAI

Raimondas Pomarnacki

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

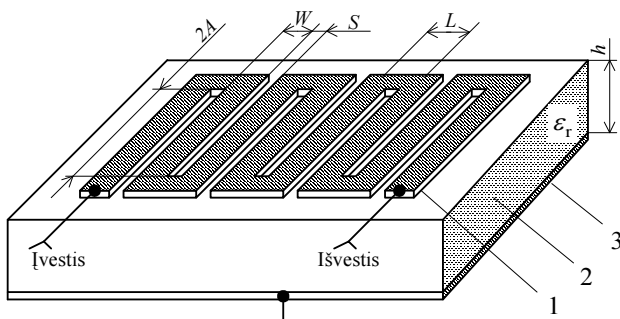
El. paštas: raimondas.pomarnacki@el.vgtu.lt

**Santrauka.** Straipsnyje nagrinėjami dispersinės lygties sprendimo būdai. Dispersinės lygties sprendiniai taikomi meandrinėms lėtinimo sistemų elektriniams parametrų apskaičiavimams. Sprendžiant dispersinę lygtį būtina žinoti analizuojamos meandrinės lėtinimo sistemos konstrukcinius parametrus ir ją modeliuojančios daugialaidės linijos laidininkų elektrinius parametrus, esant lyginiam ir nelyginiam sužadimui. Dispersinė lygtis bendruoju atveju sprendžiama skaitiniais metodais, taikant ekstremumo paieškos būdą. Skaičiuojant meandrinės lėtinimo sistemos dažnines charakteristikas, sprendinių paiešką tenka vykdyti daug kartų, taigi, šiuos skaičiavimus racionalu vykdyti pasitelkus lygiagrečiąją kompiuterių sistemą. Straipsnyje pasiūlytas ir įgyvendintas lygiagretusis dispersinės lygties sprendimo būdas. Parodyta, kad, taikant aštuonių kompiuterių telkinį, dispersinės lygties skaičiavimo sparta padidėja tris kartus lyginant su vieno kompiuterio sparta.

**Reikšminiai žodžiai:** meandrinė lėtinimo sistema, fazės lėtinimo koeficientas, dispersinė lygtis, lygiagretieji skaičiavimai, kompiuterių telkinys.

## Įvadas

Signalams elektroninėse sistemose sinchronizuoti plačiai taikoma viena iš lėtinimo sistemų rūšių – vėlinimo linijos. Šiuo metu labai populiarios yra aktyviosios vėlinimo linijos (Kim 2007). Paskirstytųjų parametrų vėlinimo linijos, tarp jų meandrinės mikrojuostelinės vėlinimo linijos (MMVL), taip pat turi nemažai privalumų, tarkime, planariąją konstrukciją, atitinkančią šiuolaikines gamybos technologijas, elektrinių charakteristikų tiesiškumą ir parametrų pastovumą. Atsižvelgus į tai MMVL dažnai taikomos signalams sinchronizuoti (Zhou 2006), filtrams kurti ir kitiems tikslams (Vincent 2003; Shafai 2008). 1 pav. pateiktas supaprastintas MMVL konstrukcijos pavyzdys.



**1 pav.** Meandrinės mikrojuostelinės vėlinimo linijos konstrukcija: 1 – meandrinis laidininkas; 2 – dielektrinis pagrindas; 3 – ekranas

**Fig. 1.** Design of the meander microstrip delay line: 1 – meander conductor; 2 – dielectric substrate; 3 – shield

Pagrindiniai MMVL elektriniai parametrai ir charakteristikos yra šie: vėlinimo trukmė esant žemiesiems dažniams  $t_{v\check{Z}D}$ , įvesties charakteringasis impedansas esant žemiesiems dažniams  $Z_{IN\check{Z}D}$ , praleidžiamųjų dažnių juosta  $\Delta F$ , dispersinė charakteristika  $t_v(f)$  ir įvesties impedanso dažninė charakteristika  $Z_{IN}(f)$ . MMVL dispersinė charakteristika dažnai apibūdinama kaip lėtinimo koeficiento priklausomybė nuo dažnio:

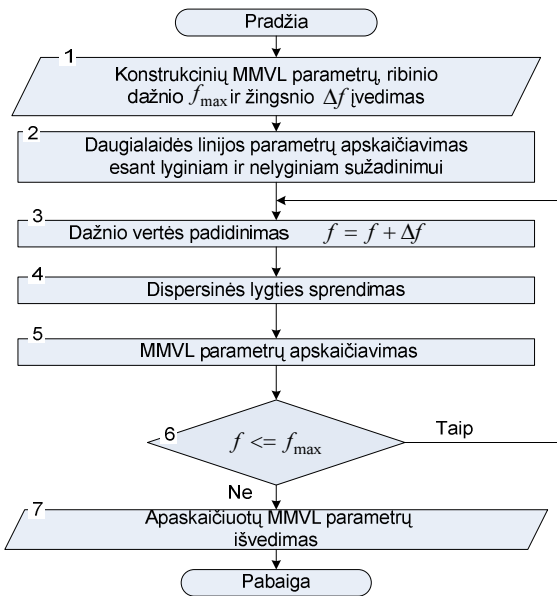
$$k_L(f) = \frac{\theta}{\beta_0 L}, \quad \text{kai } f = \frac{c_0 \beta_0}{2\pi}, \quad (1)$$

čia:  $\beta_0 = \omega / c_0$  – elektromagnetinės bangos fazės koeficientas vakuume;  $\theta$  – įtampų tarp gretimų meandro laidininkų fazių skirtumas;  $L = W + S$  – meandro laidininkų išdėstymo žingsnis;  $c_0$  – elektromagnetinės bangos fazinis greitis vakuume. MMVL dispersinė lygtis (Urbanavičius 2009) apibūdina sąryšį tarp elektromagnetinės bangos fazės koeficientų vakuume ir nagrinėjamoje MMVL. Kiekvienam pasirinktam  $\beta_0$  turi būti rasta atitinkama  $\theta$  vertė, taigi dispersinės lygties sprendinio paieškai tenka taikyti skaitinius metodus. Žinant  $\beta_0$  ir  $\theta$  vertes galima apskaičiuoti kitus elektrinius parametrus: fazės vėlinimo trukmę  $t_v$ ; charakteringąjį įvesties impedansą  $Z_{IN}$ .

## Meandrinė mikrojuostelinė vėlinimo linijų analizė

Analizuojant MMVL, siekiama apskaičiuoti lėtinimo koeficientą ir charakteringąjį įvesties impedansą. Šiuo atveju labai svarbu, tačiau ir labai sudėtinga surasti funkciją  $\theta = f(\beta_0)$ . Šios problemos praktiškai neįmanoma išspręsti be kompiuterio. Todėl yra sukurta nemažai pro-

gramų, skirtų apskaičiuoti MMVL lėtinimo koeficiento ir įvesties impedanso dažnines charakteristikas (Gurskas 2002). Tipinis programos algoritmas pateiktas 2 pav.



2 pav. Tipinis MMVL dažninių charakteristikų apskaičiavimo algoritmas

Fig. 2. Typical algorithm of MMDL frequency characteristics calculation

Algoritmas gali būti išskaidytas į dvi dalis: mikrojuostelinės daugialaidės linijos (DL), kurios skersiniai konstrukciniai parametrai atitinka analizuojamą MMVL, elektrinių parametrų apskaičiavimas, esant lyginiam ir nelyginiam sužadimui (1 ir 2 žingsniai); ir MMVL dažninių charakteristikų apskaičiavimas (3–7 žingsniai).

MMVL dispersinę lygtį galima išreikšti tokia forma (Гурскас 1991):

$$D_c D_\pi = 0; \quad (2)$$

čia

$$D_c = Y(\theta) \tan(\beta_c A) - Y(\theta + \pi) \tan^2 \theta / 2, \quad (3)$$

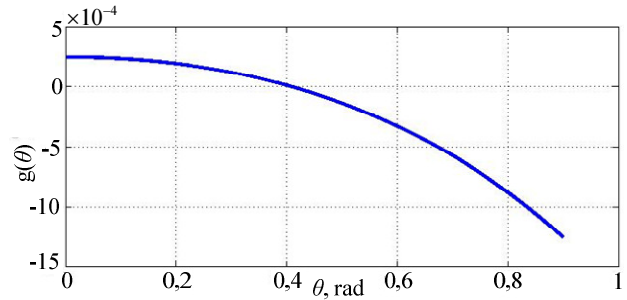
$$D_\pi = Y(\theta) \cot(\beta_\pi A) - Y(\theta + \pi) \tan(\beta_\pi A) \tan^2 \theta / 2; \quad (4)$$

čia  $Y(\theta)$  ir  $Y(\theta + \pi)$ ,  $\beta_c = \omega / c_0 \sqrt{\varepsilon_{ref}(\theta)}$  ir  $\beta_\pi = \omega / c_0 \sqrt{\varepsilon_{ref}(\theta + \pi)}$ ,  $\varepsilon_{ref}(\theta)$  ir  $\varepsilon_{ref}(\theta + \pi)$  – atitinkamai yra DL banginiai laidžiai, fazės koeficientai ir santykinės efektyviosios dielektrinės skvarbos, esant lyginiam ir nelyginiam sužadimui. MMVL dispersinės lygties sprendinio paieškai taikytini funkcijos ekstremumo paieškos metodai. Funkcijos (2) ekstremumo paieška gali trukti gana ilgai, dėl to 2 pav. pateikto algoritmo 4 žingsnis reikalauja daug laiko resursų. Tai tampa ypač aktualu sintezuojant MMVL konstrukciją.

Dispersinės lygties (2) sprendinių skirstymui surasti reikia lygtį šiek tiek pertvarkyti – jos kairiąją pusę perkelti į dešinę ir perrašyti funkcijos pavidalu. Šios funkcijos argumento vertė atitiks ieškomą sprendinį, kai pati funkcija lygi nuliui:

$$g(\theta) = D_c D_\pi = 0. \quad (5)$$

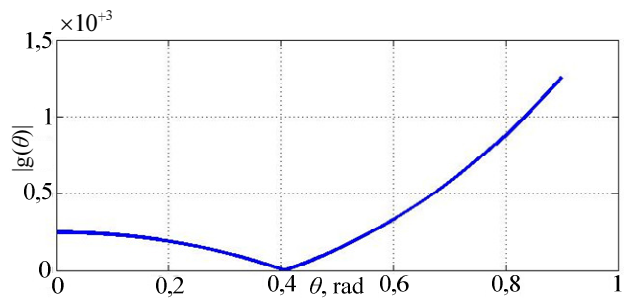
Sprendžiant šią lygtį turi būti pasirinktas dažnis  $f = \text{const}$ , o fazės vertė  $\theta$  yra keičiama. Tokio skaičiavimo rezultato pavyzdys pateiktas 3 pav.



3 pav. Dispersinės lygties verčių pasiskirstymas

Fig. 3. Result values of the dispersion equation solution

Iš 3 pav. matyti, kad didėjant fazei  $\theta$ , funkcijos (5) vertės kinta iš teigiamų į neigiamas, kertant nulinių lygi. Pakeitus funkcijos (5) vertes absoliučiomis, gaunamas 4 pav. pateiktas grafikas.



4 pav. Dispersinės lygties funkcijos absoliučiosios vertės

Fig. 4. Absolute values of the dispersion equation solution

Iš 4 pav. matyti, kad dispersinės lygties funkcija (5) visada turi nuliui lygų sprendinį. Taigi dispersinės lygties sprendimui galima naudoti funkcijos ekstremumo paieškos metodus. Autoriaus buvo įgyvendinti ir išbandyti keturi metodai, taikytini dispersinės lygties sprendinio paieškai: nuoseklus priartėjimo, dichotominis, aukštinio pjūvio ir stygų metodai (Teukolsky 1999; Kelley 1999; Вержбицкий 2001). Nagrinėjant šiuos metodus, kaip įvesties duomenys taikomi MMVL parametrai, kurie apskaičiuoti taikant analogiškos konstrukcijos mikrojuoste-

linės DL modelį: charakteringasis impedansas, esant lyginiam ir nelyginiam sužadiniui  $Z_{e,0}$ . Dispersinės lygties sprendinio paieškai taip pat reikia įvesti meandro aukštį  $2A$  (1 pav.) ir dažnio vertę  $f$ .

### Dispersinės lygties sprendimo algoritmai

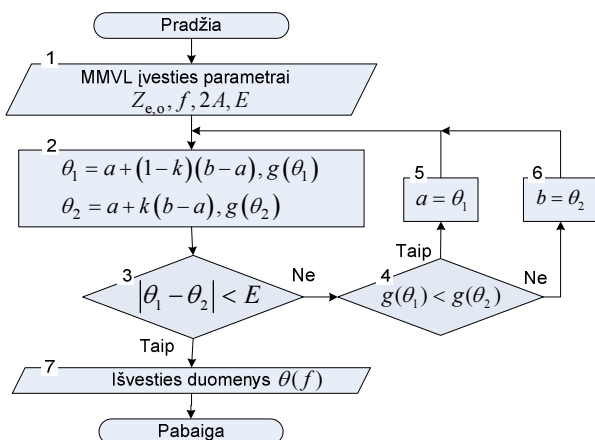
Šiame skyriuje pateiksime aukšnio pjūvio ir stygų metodais grįstus dispersinės lygties sprendinio paieškos algoritmus, kurie įgyvendinimo aspektu yra sudėtingiausi tarp nagrinėtųjų.

Dispersinės lygties sprendimo, pagrįsto aukšnio pjūvio metodu (Teukolsky 1999), algoritmas pateiktas 5 pav. Pagal šį metodą yra taikomas sprendinio paieškos intervalas, kuris iteraciškai skaidomas pusiau. Tačiau pagal metodą skaičiuojama tik viena dispersinės lygties funkcijos vertė intervalui  $(b-a)$  nustatyti ir susiaurinti. Šio metodo algoritmą sudaro 7 žingsniai:

1. Įvedami mikrojuostelinės DL charakteringasis impedansas, esant lyginiam ir nelyginiam sužadiniui  $Z_{e,0}$ , pradinė fazės vertė  $\theta_0$ , fazės kitimo žingsnis  $\Delta\theta$ , meandro aukštis  $2A$  ir dažnio vertė  $f$ , didžiausia leistina skaičiavimų paklaida  $E$ . Apskaičiuojamas intervalo dalinimo koeficientas  $k$ . Pažymėkime, kad nagrinėjamuose algoritmuose iš esmės taikomi tie patys pradiniai duomenys, taigi, kito algoritmo aprašyme jų nebevardinsime.

2. Apskaičiuojamos  $\theta_1 = a + (1-k)(b-a)$  ir  $\theta_2 = a + k(b-a)$  pagalbinės ašys bei šias ašis atitinkančios dispersinės lygties funkcijos vertės  $g(\theta_1)$  ir  $g(\theta_2)$ .

3. Tikrinama sąlyga  $|\theta_2 - \theta_1| < E$ , jeigu ji teisinga, tuomet apskaičiuojama fazės vertė  $\theta = (\theta_1 + \theta_2) / 2$  ir rezultatas yra vaizduojamas bei saugojamas (7 žingsnis). Jeigu sąlyga neteisinga – pereinama prie 4-ojo žingsnio.



5 pav. Aukšnio pjūvio metodo algoritmas

Fig. 5. Algorithm of the gold section search method

4. Tikrinama sąlyga  $g(\theta_1) < g(\theta_2)$ . Jeigu ji teisinga, tai pereinama prie 5-ojo žingsnio. Jeigu teisinga kita sąlyga  $g(\theta_1) \geq g(\theta_2)$  – pereinama prie 6-ojo žingsnio.

5. Priskiriamos naujos vertės  $a = \theta_1$ ,  $\theta_1 = \theta_2$ ,  $g(\theta_1) = g(\theta_2)$  ir pereinama prie 2-ojo žingsnio.

6. Priskiriamos naujos vertės  $b = \theta_2$ ,  $\theta_2 = \theta_1$ ,  $g(\theta_2) = g(\theta_1)$  ir pereinama prie 2-ojo žingsnio.

7. Vaizduojama ir išsaugojama apskaičiuota  $\theta(f)$  reikšmė.

Paskutiniu metu iš MMVL dispersinės lygties sprendimo metodų buvo nagrinėjamas stygų metodas (Вержбицкий 2001). Šis metodas panašus į nuosekliojo priartėjimo metodą, tačiau pagal jį dispersinės lygties funkcija (5) yra skaičiuojama du kartus. Panaudotos pradinės pasirinktos fazės vertės ir apskaičiuotos pagal jas funkcijos vertės taikomos kitai fazės vertei apskaičiuoti. MMVL dispersinės lygties sprendimo algoritmą, pagal stygų metodą sudaro 5 žingsniai (6 pav.):

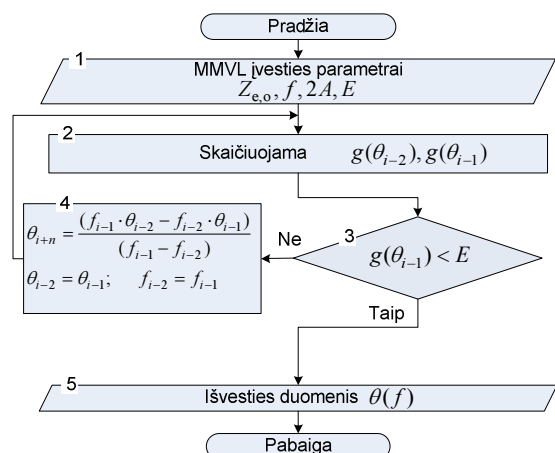
1. Įvedami pradiniai meandrinės mikrojuostelinės vėlinimo linijos analizės parametrai.

2. Apskaičiuojamos dispersinės lygties funkcijos vertės  $g(\theta_{i-2})$  ir  $g(\theta_{i-1})$ , pagal priimtas pradines fazės vertes  $g(\theta_0)$  ir  $g(\theta_1)$ .

3. Tikrinama sąlyga  $g(\theta_{i-1}) < E$ . Jeigu ji teisinga – pereinama prie 5-ojo žingsnio, jeigu neteisinga – pereinama prie 4-ojo žingsnio.

4. Apskaičiuojama nauja fazės vertė  $g(\theta_{i+n}) = (f_{i-1} \cdot \theta_{i-2} - f_{i-2} \cdot \theta_{i-1}) / (f_{i-1} - f_{i-2})$ , be to priskiriamos naujos vertės  $\theta_{i-2} = \theta_{i-1}$ ,  $\theta_{i-1} = \theta_{i+n}$ , bei  $f_{i-2} = f_{i-1}$  ir pereinama prie 2-ojo žingsnio.

5. Apskaičiuota  $\theta(f)$  vertė vaizduojama ir išsaugojama.



6 pav. Stygų metodo algoritmas

Fig 6. Algorithm of the chord search method

Nagrinėjant įgyvendintų algoritmų veikimą pastebėta, kad dispersinės lygties sprendinio radimas konkrečiam dažniui trunka mažiau nei  $10^{-6}$  s, taigi pagal kuri algoritmą lygtis sprendžiama sparčiausiai galima nustatyti tik analizuojant platų dažnių ruožą. Šiam tikslui visuose algoritmuose reikėtų sudaryti `for` ciklą dažnio vertei pakeisti, bei išsaugoti kiekvieną apskaičiuotą vertę  $\theta(f)$ . Dispersinės lygties  $10^6$  dažnio taškų skaičiavimo trukmės, taikant įvairius ekstremumų paieškos algoritmus, pateiktos 1 lentelėje.

**1 lentelė.** Dispersinės lygties sprendinių paieškos algoritmų vykdymo trukmė

**Table 1.** Execution time of algorithms of search of dispersion equation solutions

Paieškos metodas	Vykdymo trukmė, s
Nuosekliojo priartėjimo	80,55
Dichotominis	75,41
Auksinio pjūvio	196,90
Stygų	73,51

Iš 1 lentelės matyti, kad sparčiausias algoritmas yra įgyvendintas pagal stygų metodą. Jis beveik 2,6 karto spartesnis už auksinio pjūvio metodą. Iš 1 lentelės taip pat matyti, kad paieškos trukmė, taikant įvairius ekstremumų paieškos algoritmus, nėra labai didelė, tačiau dar labiau padidinus nagrinėjamų dažnio taškų skaičių turėtų atitinkamai išryškėti ir skirtumas tarp šių metodų veikimo spartos.

### Lygiagrečioji meandrinės mikrojuostelinės vėlinimo linijos analizės sistema

Tikslioms MMVL charakteristikoms gauti jų analizė vykdoma plačiame dažnių ruože. Siekiant sumažinti skaičiavimo trukmę, racionalu būtų dispersinės lygties sprendinio dažnio taškus  $f$  paskirstyti tarp kompiuterių telkinio mazgų. Šiuo atveju kiekvienas mazgas turėtų lokalųjį dažnio taškų intervalą  $\Delta f$ , kuriame būtų ieškomos fazės vėlinimo trukmės. Dispersinės lygties sprendimo kompiuterių telkinyje algoritmas pateiktas 7 pav. Algoritme pritaikyta „vedantysis-pavaldisis“ (angl. *master-slave*) programavimo paradigma (Almeida 2004). Algoritmą sudaro 7 žingsniai:

1. Įvedami konstrukciniai MMVL parametrai: pagrindo dielektrinė skvarba  $\epsilon_r$  ir jo storis  $h$ ; meandro strypų plotis  $W$  ir tarpas tarp jų  $S$ ; meandro aukštis  $2A$  ir nagrinėjamas dažnių intervalas  $\Delta F$ .

2. Apskaičiuojami daugialaidės mikrojuostelinės linijos elektriniai parametrai esant lyginiam ir nelyginiam sužadimui.

3. Nagrinėjamas dažnių intervalas dalinamas į lokaliuosius dažnių intervalus  $\Delta f = \Delta F/P$ ; čia  $P$  – kompiuterių telkinio mazgų skaičius.

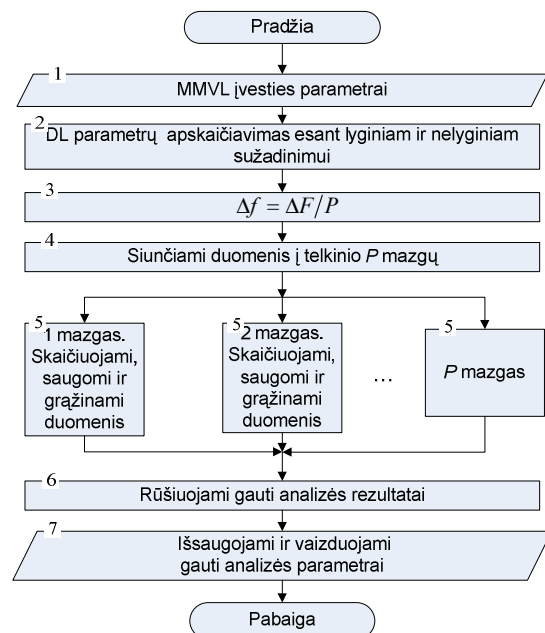
4. Lokaliųjų dažnių intervalų pradžios, pabaigos ir dažnių žingsniai siunčiami kiekvienam telkinio mazgui.

5. Kiekviename mazge (pavaldžiamame kompiuteryje) atliekama dispersinės lygties sprendinio paieška ir fazės vėlinimo trukmės apskaičiavimas nurodytame lokaliajame dažnių ruože. Gaunami rezultatai yra išsaugojami ir persiunčiami valdančiajam mazgui. Šiuo žingsniu galima taikyti bet kuri iš anksčiau aptartų dispersinės lygties sprendinio paieškos metodų.

6. Valdantysis mazgas surūšiuoja iš pavaldžijų mazgų gautus analizės rezultatus atsižvelgdamas į analizuojamo dažnio intervalo vientisumą.

7. Visi apskaičiuoti MMVL analizės parametrai yra išsaugomi ir atvaizduojami.

Pasiūlytas lygiagretusis skaičiavimo algoritmas (7 pav.) autoriaus buvo įgyvendintas MPICH2 klasteryje (MPICH2 2009), taikant iki 8 kompiuterių (CPĮ – Pentium™ 4, 1,7 GHz; pagrindinės atminties talpa – 512 MB; operacinė sistema – Fedora 6; kompiuterių tinklas – Ethernet 1 Gb/s). Šis algoritmas taikytinas ir daugelio branduolių mikroprocesorių sistemose. Šiuo atveju taikomi tie patys įvesties duomenys tačiau, programuojant lygiagrečiųjų skaičiavimų valdymą (3–6 žingsniai), naudojamos kitokios funkcijų specializuotos bibliotekos.



**7 pav.** MMVL elektrinių charakteristikų apskaičiavimo algoritmas pritaikytas lygiagrečiai sistemai

**Fig. 7.** Algorithm of calculation of electrical characteristics of MMDL using the parallel system

2 lentelė. Lygiagrečiojo algoritmo vykdymo trukmė

Table 2. Execution time of parallel algorithm

Kompiuterių telkinio parametrai	Mazgų skaičius				
	1	2	3	4	8
Analizės trukmė, s	80,55	57,87	40,00	33,56	20,70
Spartos didėjimas, %	–	39,2	101,4	140,0	289,1

Eksperimento metu mazgų (pavaldžiuojamų kompiuterių) skaičius buvo didinamas nuo 1 iki 8 siekiant nustatyti kompiuterių telkinio našumą. Bandymams, ieškant dispersinės lygties sprendinio, buvo taikomas nuoseklus priartėjimo metodas ir skaičiuojama MMVL dispersinė charakteristika, t. y. fazės lėtinimo koeficiento priklausomybė nuo dažnio  $10^6$  taškų. Gauti skaičiavimo trukmės rezultatai, esant įvairiam kompiuterių telkinio mazgų skaičiui, pateikti 2 lentelėje.

Iš 2 lentelės matyti, kad pasiūlytas algoritmas yra pakankamai spartus ir skaičiavimo trukmė mažėja, pridedant kompiuterių telkinyje papildomų mazgų. Pastebėtina, kad, padidinus mazgų skaičių dvigubai, skaičiavimo trukmė sumažėja maždaug 40 %. Toks ženklus skaičiavimo trukmės sumažėjimas iš esmės leidžia operatyviai analizuoti sudėtingos konstrukcijos MMVL.

## Išvados

Straipsnyje nagrinėjami meandrinės mikrojuostelinės vėlinimo linijos dispersinės lygties sprendimo būdai. Dispersinės lygties sprendinys taikomas mikrojuostelinės meandrinės vėlinimo linijos fazės vėlinimo trukmės ir kitoms elektrinėms charakteristikoms apskaičiuoti. Aptarti ir įgyvendinti keturi dispersinės lygties sprendimo metodai: nuosekliojo priartėjimo, dichotominis, auksinio pjūvio ir stygų. Atlikus eksperimentinius bandymus taikant  $10^6$  dažnio taškų, sparčiausiu algoritmu pripažintas algoritmas, įgyvendintas pagal stygų metodą – skaičiavimai pagal jį truko 73,51 s (CPI – Pentium™ 4, 1,7 GHz; pagrindinės atminties talpa – 512 MB; operacinė sistema – Fedora 6), o lėčiausias algoritmas įgyvendintas pagal auksinio pjūvio metodą, jo vykdymo trukmė, lyginant su stygų metodo algoritmu, skiriasi net 2,6 karto.

Taip pat pasiūlytas lygiagretusis dispersinės lygties sprendimo algoritmas. Gauta dispersinės lygties sprendimo sparta, esant įvairiam kompiuterių telkinio mazgų skaičiui. Naudojant 8 mazgų kompiuterių telkinį skaičiavimo sparta padidėjo 289 % palyginus su skaičiavimo sparta taikant tik vieną kompiuterį.

## Literatūra

Almeida, F.; Gonzalez, D.; Morena, L. M. 2004. The master-slave paradigm on heterogeneous systems: a dynamic pro-

gramming approach for the optimal mapping, in *Proceedings of 12<sup>th</sup> Euromicro Conference. Parallel, Distributed and Network-Based Processings*, 266–272.

doi:10.1109/EMPDP.2004.1271454

Gurskas, A.; Jurevičius, V.; Kirvaitis, R.; Šileikis, A. 2002. Application of Scattering Matrices in Investigation of Electrodynamical Systems. *Electronics and Electrical Engineering* 4(39): 7–12.

Kelley, C. T. 1999. *Iterative Methods for Optimization*. SIAM: Philadelphia. 202 p. ISBN: 0-89871-433-8.

Kim H.; Bien, F.; Hur, Y.; Chandramouli, S.; Cha, J.; Gebara, E.; Laskar, J. 2007. A 0.25-um BiCMOS feed forward equalizer using active delay line for backplane communication, in *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, New Orleans, USA, 193–196.

MPICH2: *High-performance and widely portable MPI* [interaktyvus]. [žiūrėta 2009 m. sausio 28 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.mcs.anl.gov/research/projects/mpich2/>>.

Shafai, C.; Sharma, S. K.; Yip, J.; Shafai, L. 2008. Microstrip delay line phase shifter by actuating integrated ground plane membranes, in *Microwave, Antenas & Propagation*, IET. Winnipeg, USA, 163–170.

Teukolsky, S. A.; Vetterling, W. T.; Flannery, B. P. 1999. *Numerical Recipes in C, The Art of Scientific Computing* (second ed.). Cambridge: Cambridge University Press. 1002 p. ISBN-13 978-0521750332

Urbanavičius, V.; Gurskas, A.; Martavičius, R. 2009. Simulation of the meander delay line using the hybrid method, *Electronics and Electrical Engineering* 2(90): 3–6.

Vincent, P.; Culver, J.; Eason, S. 2003. Meandered line microstrip filter with suppression of harmonic passband response, in *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, St. Petersburg, USA (3): 1905–1908.

Zhou, W.; Ou, X.; Zhou, H.; Wang, B.; Yang, X. 2006. A time interval measurement technique based on time and space relationship processing, in *IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition*, Miami, USA, 260–266.

Вержбицкий, В. 2001. *Численный методы (математический анализ и обыкновенные дифференциальные уравнения)*. Москва.

Гурскас, А. 1991. *Исследование и разработка меандровых микрополосковых линий задержки*. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Вильнюс.

## PARALLEL SYSTEM FOR ANALYSIS OF MEANDER DELAY LINE

R. Pomarnacki

Abstract

Meander microstrip delay lines (MMDL) are widely used in electronic systems. The basic difficulty designing MMDL is the solution of the dispersion equation, which defines the relation between phase coefficient of electromagnetic wave in the free space and in the investigated MMDL. To shorten the time of solving the dispersion equation the parallel algorithm is offered. The algorithm has been implemented on 8 computers cluster MPICH2. Examination of the operation of the cluster has shown that each doubling of the number of nodes increments the efficiency of the cluster approximately by 40%.

**Keywords:** meander microstrip delay line, phase delay coefficient, dispersion equation, parallel calculations.