

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Audrius KRUKONIS

INVESTIGATION OF MICROSTRIP
DELAY SYSTEMS IN FREQUENCY
AND TIME DOMAIN

SUMMARY OF DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING (01T)



Vilnius LEIDYKLA
TECHNIKA 2013

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2009–2013.

Scientific Supervisor

Prof Dr Vytautas URBANAVIČIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Electrical and Electronic Engineering – 01T).

The dissertation is being defended at the Council of Scientific Field of Electrical and Electronic Engineering at Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman

Prof Dr Habil Romanas MARTAVIČIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Electrical and Electronic Engineering – 01T).

Members:

Prof Dr Habil Edmundas KUOKŠTIS (Vilnius University, Physical Sciences, Physics – 02P),

Prof Dr Habil Liudmila NICKELSON (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Electrical and Electronic Engineering – 01T),

Dr Rimantas SIMNIŠKIS (State Scientific Research Institute Center for Physical Sciences and Technology, Technological Sciences, Electrical and Electronic Engineering – 01T),

Prof Dr Algimantas VALINEVIČIUS (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Electrical and Electronic Engineering – 01T).

Opponents:

Prof Dr Habil Julius SKUDUTIS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Electrical and Electronic Engineering – 01T),

Prof Dr Habil Juozapas Arvydas VIRBALIS (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Electrical and Electronic Engineering – 01T).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Council of Scientific Field of Electrical and Electronic Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at 1 p. m. on 22 November 2013.

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4952, +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112;

e-mail: doktor@vgtu.lt

The summary of the doctoral dissertation was distributed on 21 October 2013.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Audrius KRUKONIS

MIKROJUOSTELINIŲ LĒTINIMO
SISTEMŲ TYRIMAS DAŽNINIAIS
IR LAIKO SRITIES METODAIS

DAKTARO DISERTACIJOS SANTRAUKA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS INŽINERIJA (01T)



Vilnius LEIDYKLA
TECHNIKA 2013

Disertacija rengta 2009–2013 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.
Mokslinis vadovas

prof. dr. Vytautas URBANAVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T).

Disertacija ginama Vilniaus Gedimino technikos universiteto Elektros ir elektronikos inžinerijos mokslo krypties taryboje:

Pirmininkas

prof. habil. dr. Romanas MARTAVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T).

Nariai:

prof. habil. dr. Edmundas KUOKŠTIS (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02P),

prof. habil. dr. Liudmila NICKELSON (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T),

dr. Rimantas SIMNIŠKIS (Valstybinis mokslinių tyrimų institutas Fizinių ir technologijos mokslų centras, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T),

prof. dr. Algimantas VALINEVIČIUS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T).

Oponentai:

prof. habil. dr. Julius SKUDUTIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T),

prof. habil. dr. Juozapas Arvydas VIRBALIS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T).

Disertacija bus ginama viešame Elektros ir elektronikos inžinerijos mokslo krypties tarybos posėdyje 2013 m. lapkričio 22 d. 13 val. Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel.: (8 5) 274 4952, (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112;

el. paštas doktor@vgtu.lt

Disertacijos santrauka išsiuntinėta 2013 m. spalio 21 d.

Disertaciją galima peržiūrėti Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva).

VGTU leidyklos „Technika“ 2170-M mokslo literatūros knyga.

Introduction

Topicality of the problem

Slow-wave systems are widely applied for various purpose microwave devices: antennas, filters, phase converters and dividers, delay lines, analog signal processing devices and so on. Spiral or meander structure slow-wave systems are used in these devices, which are investigated by analytical, numerical or hybrid methods.

The designing of the slow-wave systems began from the use of analytical methods, i. e. circuit and long lines theory and their application, and from the twentieth century eighties began intensive slow-wave systems research, when showed up mainframe computers. Simpler slow-wave systems designs were considered with analytical methods, in addition were wasn't taken into account a number of physical factors. Created numerical methods allowed to investigate complex structure slow-wave systems, but because of small computing power and long computation time a relatively small, simple structures were analysed at that time. Analysis of these structures led to the development of new models and numerical methods, which allowed faster and more accurate assessment of the characteristics of slow-wave systems. The first commercial electromagnetic fields solution and slow-wave systems design software packages created after a few decades, when workstations and personal computers spread. At the end of twentieth century faster computers and more efficient software packages allowed to optimize planar slow-wave systems. In recent years hybrid methods were applied for slow-wave systems analysis and synthesis – a combination of several different methods (artificial neural networks, fuzzy logic, analytical and numerical).

To satisfy the telecommunications, signal processing and other scientific and industrial needs, the constant development of new electronic systems operating in the higher frequency range is ongoing, for this reason it is necessary to improve the slow-wave systems models and structures. When developing new slow-wave system models it must be taken into account structural inhomogeneities in delay devices, which results undesirable signal reflections – narrows the working bandwidth of the slow-wave system and whole device. Therefore it is desirable to seek new slow-wave system designs, which allows broadening the bandwidth and reducing undesirable reflections in the system.

Computational capabilities and possibilities are constantly increasing, but current slow-wave systems analysis and synthesis methodologies and algorithms do not allow to quickly and efficiently find parameters of the slow-wave system. Therefore, it is important to look for new automated slow-wave sys-

tems analysis and synthesis methods for the reduction of these systems design time.

Object of research

Objects of research – mathematical models of multiconductors and meander delay lines.

Aim of the work

The aim of the work is to create models based on finite difference time domain method and to investigate non-uniformity influence of marginal and terminal conductors of microstrip meander delay lines on time and frequency characteristics, propose microstrip meander delay lines improvement measures.

Tasks of the work

To achieve the aim of the work the following tasks must be solved:

1. Create microstrip and multiconductor microstrip lines models and investigate time and frequency characteristics, based on the finite difference and finite difference time domain analysis methods.
2. Create uniform characteristic impedance multiconductor microstrip lines synthesis and meander microstrip delay lines analysis algorithms and their time and frequency characteristic calculation methodology.
3. Validate the efficiency of proposed slow-wave systems parameters calculation methods using imitational calculations.

Methodology of research

The work applies methods of electrodynamic problem solution adapted for analysis and synthesis of slow-wave systems – multiconductor lines, numerical time and frequency domain methods. Computer models of slow-wave systems and developed algorithms are implemented using Matlab[®], specialized CST Microwave Studio[®] and Sonnet[®] software packages.

Scientific novelty

The following results, significant to science of electrical engineering were obtained:

1. Created finite dimensions microstrip transmission line structure models, based on the finite difference and finite difference time domain methods, and investigated electrical characteristics of these structures over a wide frequency range.

2. Created and implemented algorithms based on the multiconductor lines, finite difference and finite difference time domain methods, that allows investigate frequency characteristics of meander slow-wave systems terminal conductors. Results of these calculations are used for synthesis of uniform characteristic impedance slow-wave systems.

3. Created meander microstrip slow-wave system mathematical model, based on finite difference time domain method, for estimating the uniformity of slow-wave systems marginal and terminal conductors effects on systems frequency characteristics.

Practical value

Created analysis and synthesis calculation methodologies for the slow-wave systems development and estimation inhomogeneities in system– marginal and terminal conductors influence on the slow-wave systems performance. Slow-wave systems frequency characteristics calculation algorithms based on the multiconductor lines and finite difference time domain methods were created, that allows reducing the duration of slow-wave system design process. The resulting models and algorithms are implemented using C, C++ programming languages, Matlab[®] software package and is applicable to automated delay line design systems in order to increase the accuracy and to improve the designed device performance.

Defended propositions

1. The developed meander microstrip delay line model based on the finite difference time domain method allows to evaluate the influence of the electromagnetic field scattering at the marginal and terminal conductors to the analyzed lines characteristics and revealed that the regular rods characteristic impedance of meander can differ by more than 15 %.

2. The proposed multiconductor microstrip line synthesis algorithm allows designing a line, which conductors characteristic impedances values vary less than 1 %.

3. Meander microstrip delay lines, designed in accordance with a uniform characteristic impedance multiconductor line model, bandwidth is up to 20 % wider than the lines, designed in accordance with the periodic multiconductor line model.

4. Signal propagation delay time difference in conductors of multiconductor microstrip lines, operating in c -mode or π -mode, are less than 1 % over a wide frequency range.

The scope of the scientific work

The dissertation consists of an introduction, four chapters and a summary. The total scope of the dissertation – 128 pages, not including appendixes, 70 numbered formulae are used in the text, 53 pictures and 18 tables. Bibliography consists of 115 literature sources.

1. Review of Slow-wave Devices Structures and Their Analysis Methods

Models, properties and applications of slow-wave systems are reviewed in the first chapter. Problems which arise from the applications of slow-wave systems, also design and synthesis problems of slow-wave devices by analytical and numerical methods are considered.

Microwave slow-wave devices have components whose dimensions are the same or less in a row size as in these devices propagated electromagnetic wave length. Therefore, the electrical characteristics of microwave device are highly dependent on the structure dimensions and design, as well as on the surrounding medium characteristics. Primary electrical parameters of these devices are calculated from Maxwell's equations, which describes electric and magnetic fields. Knowing some slow-wave device structure parameters it is possible to get the electrical parameters of the device by analysis (or modelling) over a wide frequency range.

Analytical methods were used first to investigate early electromagnetic slow-wave devices. These methods provide useful design information but have very limited range of applications, because of their dependence on closed form expressions. Numerical methods allow investigating complex structure slow-wave devices, but they require large computational resources. To save computational recourses for the synthesis of meander delay line the combination of multiconductor lines, finite difference and finite difference time domain method can be used. In multiconductor line method it is assumed, what the multiconductor line is periodical and infinite, therefore it is not taken into account the non-uniformity of delay line structure – marginal and terminal conductors' effects on systems frequency characteristics.

The study is focused on slow-wave systems and mainly on microstrip multiconductor and meander delay lines. The main goal of analysis of the slow-wave systems is to determine its frequency and time characteristics – the characteristic impedance and delay time versus frequency.

Characteristic impedance of the system can be found using the equation:

$$Z_B(z, \omega) = \frac{U(z, \omega)}{I(z, \omega)}, \quad (1)$$

where $U(z, \omega)$ and $I(z, \omega)$ the voltage and current dependence on the frequency at a given point z ; ω – angular frequency.

Delay time frequency response is calculated as follows:

$$t_v(\omega) = \frac{\varphi(\omega)}{\omega}, \quad t_v(\omega) = \frac{l}{v_f(\omega)}, \quad (2)$$

where l – length of delay line; $\varphi(\omega)$ – phase frequency response; $v_f(\omega)$ – frequency response of wave phase velocity.

Modelling of slow-wave devices are useful for understanding the physical processes in the devices, which allows for modifications of the existing designs of the devices and to create new ones.

To the electrodynamic slow-wave devices investigation and applications for the electronic devices problems solving have contributed professors S. Štaras, R. Kirvaitis, R. Martavičius, J. Skudutis, L. Nickelson, V. Urbanavičius, associated professors A. Gurskas, A. Jurjevas, V. Daškevičius, R. Pamarnacki, A. Katkevičius and others. In Lithuania professors Vainorius group of scientist started slow-wave devices investigations, they created unified theory of slow-wave devices analysis, also investigated and compared many slow-wave devices characteristics and qualities. S. Štaras investigated helical and meander structures of slow-wave and deflection systems. R. Kirvaitis investigated electrodynamic properties of delay lines. R. Martavičius considered broadband planar slow-wave systems. V. Urbanavičius investigated microstrip delay lines using numerical methods. J. Skudutis and V. Daškevičius applied the specialized software for investigation of helical and meander structures of slow-wave systems.

The author of this dissertation has created a microstrip transmission, coupled, multiconductor and meander delay line models using finite difference time domain method and investigated the characteristics of these lines in a wide frequency range. The author also investigated the non-uniformity effects of meander microstrip delay lines marginal and terminal conductors to time and frequency characteristics.

2. Development and Investigation of the Microstrip Line Model

In this chapter microstrip transmission line models, designed with two different numerical methods, were investigated in order to choose the method for the synthesis of line structural parameters and to compare the accuracy of the methods. Electrical parameters of microstrip lines models, based on finite dif-

ference and finite difference time domain methods, calculated and the obtained results were compared with the other authors' results.

Microstrip transmission lines are often used for matching the transmitter and antenna, and to achieve this objective – characteristic impedance of the line must be calculated. Microstrip transmission line is also widely used in filters, dividers and other devices with a certain signal phase variations. In this case effective permittivity of microstrip transmission line must be evaluated.

Finite difference iterative and sparse matrix techniques, also Gauss law of induction and electric field energy concept were used for construction parameters of microstrip transmission lines synthesis.

Using finite difference time domain method and sparse matrix technique, potential distribution in cross section of microstrip transmission line are obtained by solving linear equation system. This kind of calculation takes considerably faster, when the iterative technique (Fig. 1).

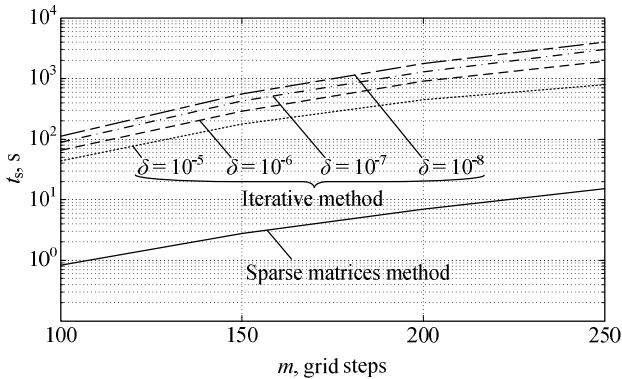


Fig. 1. Microstrip line analysis time dependence on analyzed area size and the method of calculation

According to the finite difference time domain method the partial differential form of time dependent Maxwell's equations are approximated, using central difference approximations, to calculate values of electric and magnetic fields components at every point in a problem area for every increment of time. For electromagnetic 3D field analysis of the microstrip transmission line (Fig. 2), the Yee algorithm and uniaxial perfectly matching layer is used. In this algorithm each field component depends on its value of the previous time step and the surrounding components.

The proposed technique for analysis of dispersion of the microstrip transmission line was investigated in the following order. Firstly, accuracy of the

mathematical model, used in the proposed technique, was tested. Next, the dispersion characteristics of microstrip transmission lines with different microstrip width and substrate dielectric constant were investigated.

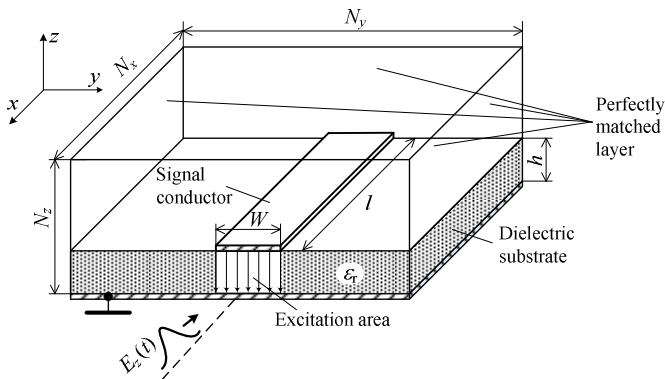


Fig 2. Microstrip line structure for analysis by finite difference time domain method

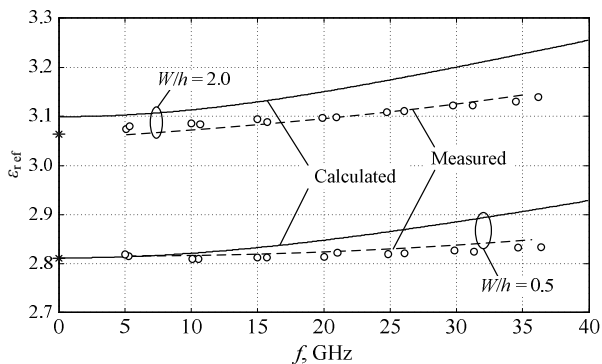


Fig. 3. Effective permittivity of microstrip line, calculated by proposed model (solid curves) and measured (dashed curves) in (Jain, Brown 1997) work dependency on frequency, when $\epsilon_r = 4.0$; $h = 0.2$ mm. Values calculated using the method of moments are pointed by asterisks

The dispersion characteristics, calculated according to finite difference time domain method, differ from measured and published by other researchers (Fig. 3) no more than 3 %. Analysis of dispersion characteristics of multiconductor transmission line reveals that dispersive properties are manifested in the

greater degree in the case of microstrip transmission line with wide microstrips and on substrates with the larger dielectric constant.

Microstrip transmission line analysis using finite difference method is much faster than the finite difference time domain method with the same computer configuration. Therefore, the finite difference method is more suitable for the initial microstrip transmission lines structural parameters synthesis and the finite difference time domain method more suitable for line analysis of these structural parameters in wide frequency range.

3. Development and Investigation of the Multiconductor Microstrip Line Model

In the third chapter mathematical models of coupled and multiconductor microstrip lines are investigated and presented the results of the investigations. Uniform and non-uniform characteristic impedance calculation and synthesis methodologies are created.

Multiconductor microstrip line (Figure 4) is widely used in various microwave devices: filters, antennas, slow-wave systems and delay devices. In periodic multiconductor microstrip line, consisting of equal width of signal conductors, electromagnetic wave propagation speed of each conductor in theory is the same as well as the characteristic impedance. This assumption lets perfectly match sources and loads with multiconductor microstrip line. However, the actual multiconductor microstrip lines are fabricated from finite number of conductors – these lines are non periodic and electrical parameters of these lines in general case are different.

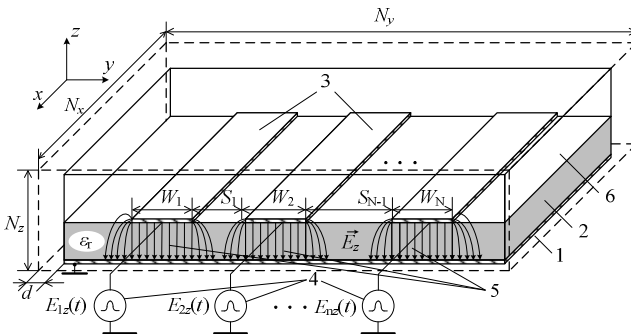


Fig. 4. Multiconductor microstrip structure for analysis: 1 – reference conductor; 2 – dielectric substrate; 3 – signal conductors; 4 – signal source; 5 – excitation area (marked as straight, without side spread, electric field lines) in cross section; 6 – perfectly matching layer

In created coupled and multiconductor line models a quasi-static approach is applied, therefore in voltage and current calculations the longitudinal components of electric and magnetic fields unestimated in higher frequencies. With increasing frequency also increases longitudinal components and results uncertainty. In order to lower the uncertainty of analysis, the longitudinal components in coupled and multiconductor microstrip lines must be estimated.

Model verification was done by comparison of dispersion characteristics of the multiconductor microstrip line, which operates in different modes, and calculated using the proposed technique and measured by other authors (Figure 5). For these calculations three-conductors multiconductor microstrip line was used, which geometry parameters are as follows: $h = 0.635$ mm; $W_1 = 0.3$ mm; $S_1 = 0.2$ mm; $W_2 = 0.6$ mm; $S_2 = 0.4$ mm; $W_3 = 1.2$ mm; substrate $\epsilon_r = 9.8$.

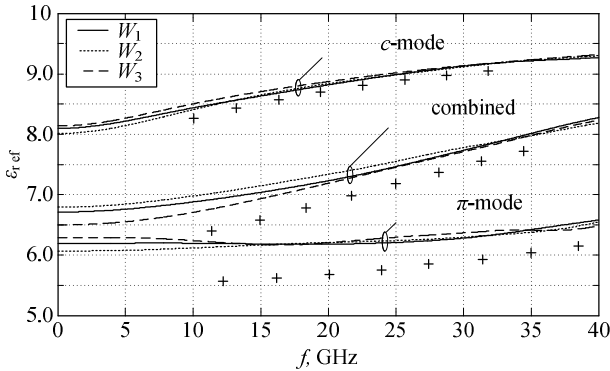


Fig. 5. Effective permittivity of three conductors multiconductor microstrip line dependencies on frequency and on mode. Values calculated by other authors work marked as crosses

Effective permittivity calculated according to proposed model differ from measured and published by other researchers no more than 10 % in lower frequency range and less in higher frequency range.

Due to dispersion and coupling effects delay time of each conductor is different and depends on the space between them. The largest time delay difference of the analysed multiconductor microstrip line is observed between outside and inside conductors. Analysis of dispersion and coupling effects of the multiconductor microstrip line reveals, that coupling effect is greater when space between conductors is narrower. Due to this effect time delay difference of each conductor of the multiconductor microstrip line is greater when the multiconductor microstrip line operates in hybrid mode.

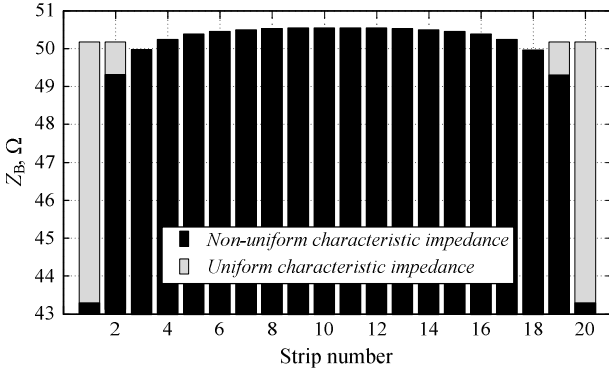


Fig. 6. Conductors characteristic impedance of multiconductor microstrip line based on periodic multiconductor microstrip line (black color) and uniform characteristic impedance (grey color) synthesis algorithms, when $\epsilon_r = 9.6$; $h = 0.5$ mm; $W = 0.6$ mm; $S = 0.5$ mm; $N = 20$

Two different multiconductor microstrip line synthesis algorithms were created, which allows quickly find structural parameters of desired uniform and non-uniform characteristic impedance. In figure 6 shown multiconductor microstrip lines characteristic impedance values of each conductor calculated with uniform and non-uniform algorithms. Structural parameters acquired with these algorithms can be used for designing meander microstrip delay lines.

4. Development and Investigation of the Meander Microstrip Delay Line Model

In the fourth chapter two meander microstrip delay line models, based on finite difference time domain method and multiconductor lines in combination with finite difference method, were created and investigated their frequency characteristics dependence on structural parameters. Proposed microstrip meander delay line models analysis results are compared with the results obtained using software packages CST Microwave Studio[®] and Sonnet[®]. The influence of non-uniformity of the multiconductor microstrip line parameters on the responses of the meander microstrip delay line is investigated.

In order to match any transmission line, including the meander microstrip delay line, with the remaining signal transmission path, impedances of the meander microstrip delay line and the path must be equal. Designing the MMDL according to the multiconductor line method, it is supposed, that the impedance of all meander strips is uniform (identical) and their widths W are also identical.

However, real meander microstrip delay lines have finite number of meander strips, therefore inhomogeneity of an electric field takes place on the marginal strips, resulting in different impedances of marginal and inner strips. The generalized structure of the microstrip meander delay line is presented in figure 7. It consists of a dielectric substrate, on one side in which is a conductive layer, and a meander shaped transmission conductor on the other side.

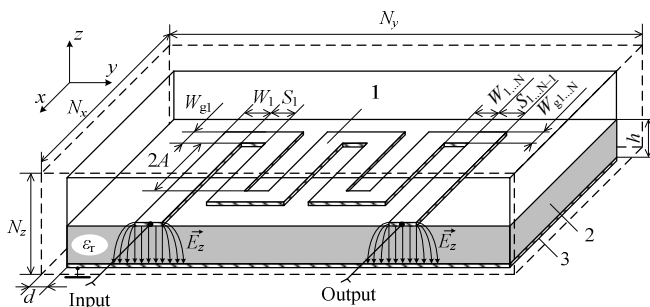


Fig. 7. Structure of meander microstrip delay line: 1 – signal conductors; 2 – dielectric substrate; 3 – reference conductor (shield)

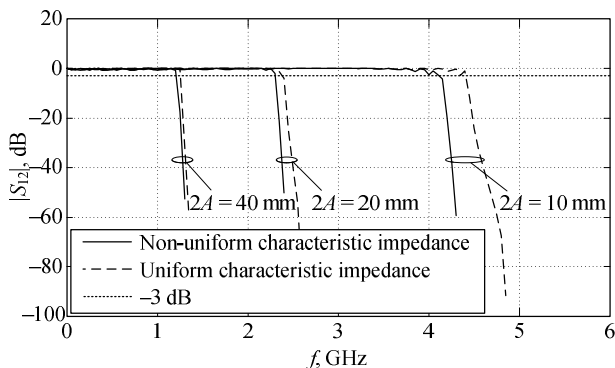


Fig. 8. Magnitude response of parameter S_{12} with different height meander strips of the meander microstrip delay line, which design parameters are following:
 $\epsilon_r = 9.6$; $h = 0.5$ mm; $N = 20$

Proposed meander microstrip delay line model is verified by comparing the calculated frequency characteristics of meander microstrip delay line with similar characteristics obtained by analyzing the same topology models with Sonnet[®] software package. Differences of pass band amplitude frequency char-

acteristics of proposed meander microstrip delay line model and characteristics obtained with Sonnet[®] software package are less than 2 dB and characteristic impedance dependence on frequency differences – 4 %.

The performed calculations showed that the meander microstrip delay line based on the model of the uniform impedance multiconductor microstrip line is better matched with the transmission path and has a wider bandwidth than the non-uniform impedance meander microstrip delay line (Figure 8). However, delay time of the uniform impedance meander microstrip delay line due to the fact that the electromagnetic wave propagates in them faster is always slightly less than the delay time of the non-uniform impedance meander microstrip delay line.

General Conclusions

1. Proposed microstrip transmission line, coupled microstrip line and multiconductor microstrip line models, based on finite difference and finite-difference time domain method, allows to study regular and irregular meander microstrip delay lines, consisting of a finite number of strips. The adequacy of the models is verified by comparing the electrical parameters obtained from proposed models and from other authors provided similar parameter values measurements.

2. Computer experiments shown that created meander microstrip delay line models, based on the finite difference time domain method allow to evaluate the electric field scattering in conductors and nature of change of electrical parameters in a wide frequency range.

3. Computer studies have shown that c -mode and π -mode normal waves cannot propagate at the same time in certain multiconductor microstrip line structure, only one of the two normal wave modes can propagate. Therefore, uniform characteristic impedance multiconductor microstrip line can be synthesised only in one excitation mode.

4. Computer experiments shown that uniform characteristic impedance multiconductor microstrip line synthesis algorithm allows to design a line, which characteristic impedances of signal conductors differs less than 1 % and this allows to get meander microstrip delay line with 20 % wider bandwidth, in comparison with meander microstrip delay line designed with non-uniform multiconductor microstrip line model.

5. Studies have shown that external multiconductor microstrip line conductors have greater impact on multiconductor microstrip line equality of characteristic impedance and to better align meander microstrip delay line with the

signal transmission path, it is enough to change only the marginal meander strips width.

6. Created uniform characteristic impedance multiconductor microstrip line synthesis algorithm based on the finite difference method and sparse matrix technique allows to speed up design process of the meander microstrip delay line several times in comparison with algorithms based on finite difference method and iterative technique.

List of Published Works on the Topic of the Dissertation

In the reviewed scientific periodical publications

Krukonis, A. 2010. Baigtinių skirtumų metodo skaičiavimo būdų tyrimas, *Mokslas – Lietuvos ateitis* 2(1): 103–107. ISSN 2029-2252. (Inspec).

Pomarnacki, R.; Krukonis, A.; Urbanavičius, V. 2010. Parallel Algorithm for the Quasi-TEM Analysis of Microstrip Multiconductor Line, *Electronics and Electrical Engineering* 5(101): 83–86. ISSN 1392-1215. (ISI Web of Science).

Pomarnacki, R.; Krukonis, A. 2011. Parallel Algorithm for the Quasi-TEM Analysis of Microstrip Multiconductor Line, *Mokslas – Lietuvos ateitis* 3(1): 104–109. ISSN 2029-2252. (ICONDA, Gale[®], ProQuest, EBSCOhost, IndexCopernicus).

Krukonis, A.; Urbanavičius, V. 2011. Investigation of Microstrip Lines Dispersion by the FDTD Method, *Electronics and Electrical Engineering* 9(115): 83–86. ISSN 1392-1215. (ISI Web of Science).

Krukonis, A.; Mikučionis, Š. 2013. Susietųjų mikrojuostelinių linijų dažninės charakteristikos, *Mokslas – Lietuvos ateitis* 2(1): 103–107. ISSN 2029-2252. (ICONDA, Gale[®], ProQuest, EBSCOhost, IndexCopernicus).

Krukonis, A.; Mikučionis, Š.; Urbanavičius, V. 2013. The Influence of Non-Uniformity of the Multi-Conductor Line Parameters on Frequency Responses of the Meander Delay Line, *Electronics and Electrical Engineering* 19(6): 81–86. ISSN 1392-1215. (ISI Web of Science).

In the other editions

Krukonis, A.; Urbanavičius, V. 2012. Multiconductor microstrip line modelling using FDTD method, in *Proceedings of the 22nd international conference “Electromagnetic disturbances EMD’2012”*, held in Vilnius, Lithuania on 20–21 September, 2012. [Tarptautinės konferencijos „EMD’2012“, įvykusios Vilniuje 2012 m. rugsėjo 20–21 d., mokslinių pranešimų rinkinys]. Vilnius: Technika, 60–63. ISSN 1822-3249. ISBN 9786094572609.

About the author

Audrius Krukonis was born in Vilnius, on 28 of September 1984. First degree in Electrical Engineering, Faculty of Electrical Engineering, Vilnius Gediminas Technical University, 2007. Master of Science in Electrical Engineering, Faculty of Electrical Engineering, Vilnius Gediminas Technical University, 2009. In 2009–2013 – PhD student of Vilnius Gediminas Technical University. At present – Junior researcher and assistant in Department of Electronic Systems of Vilnius Gediminas Technical University.

MIKROJUOSTELINIŲ LĒTINIMO SISTEMŲ TYRIMAS DAŽNINIAIS IR LAIKO SRITIES METODAIS

Mokslo problemos aktualumas

Lėtinimo sistemos (LS) plačiai taikomos įvairios paskirties mikrobangų įtaisuose: antenose, filtruose, faziniuose keitikliuose ir šakotuvuose, vėlinimo linijose, analoginio signalų apdorojimo įtaisuose ir kt. Šiose sistemose dažniausiai taikomos spiralinės arba meandrinės sandaros LS, kurių tyrimui taikomi analitiniai, skaitiniai arba hibridiniai metodai.

Lėtinimo sistemų projektavimas prasidėjo nuo analitinių metodų panaudojimo, t. y. grandinių ir ilgųjų linijų teorijos taikymo ir nuo XX a. aštunto dešimtmečio, atsiradus didiesiems kompiuteriams (angl. *mainframe computers*), prasidėjo intensyvesni LS tyrimai. Analitiniais metodais buvo nagrinėjamos paprastesnės LS konstrukcijos, be to nebuvo atsižvelgiama į daugelį fizikinių veiksnių. Sukurti skaitiniai metodai leidžia nagrinėti sudėtingų konstrukcijų LS, tačiau, dėl mažų tuometinių skaičiavimo pajėgumų, ilga sprendimo trukmė leido analizuoti tik palyginti mažas, nesudėtingas struktūras. Šių struktūrų analizė leido sukurti naujus modelius ir skaitinius metodus, leidžiančius greičiau ir tiksliau įvertinti LS charakteristikas. Pirmieji komerciniai elektromagnetinių laukų sprendimo ir LS projektavimo programų paketai sukurti po kelių dešimtmečių, paplitus darbo stotims ir asmeniniams kompiuteriams. XX a. pabaigoje spartesni kompiuteriai ir efektyvesnė programinė įranga leido optimizuoti planarines LS struktūras. Pastaraisiais metais LS analizei bei sintezei pradėti taikyti hibridiniai metodai – kelių metodų kombinacijos (dirbtinių neuronų tinklų, neraiškiosios logikos, analitinių ir skaitinių metodų).

Tenkinant telekomunikacijų, signalų apdorojimo ir kitų mokslo ir pramonės sričių poreikius nuolat kuriamos naujos elektroninės sistemos veikiančios vis aukštesnio dažnio radijo bangų diapazone, dėl šios priežasties būtina tobulinti LS ir jų struktūrų modelius. Kuriant naujus LS modelius būtina atsižvelgti į šiose sistemose taikomų lėtinimo įtaisų (LI) konstrukcijų netolygumus, dėl

kurių susidaro nepageidaujami signalų atspindžiai, kurių pasekmė – siaurėja lėtinimo sistemos ir viso įtaiso, kuriame jos naudojamos, darbo dažnių sritis. Todėl tikslinga ieškoti naujų lėtinimo sistemų konstrukcijų, leidžiančių praplėsti darbo dažnių sritį bei sumažinti šioje sistemoje esančius nepageidaujamus signalų atspindžius.

Skaičiavimo technikos pajėgumai ir galimybės nuolat didėja, tačiau esamos LS analizės bei sintezės metodikos ir algoritmai neleidžia greitai ir efektyviai surasti lėtinimo sistemų parametrus. Todėl yra aktualu ieškoti naujų automatizuoto lėtinimo sistemų analizės bei sintezės metodų, leidžiančių sumažinti šių sistemų projektavimo trukmę.

Tyrimų objektas

Darbo tyrimų objektas – daugialaidžių ir meandrinių mikrojuostelinių linijų matematiniai modeliai.

Darbo tikslas

Šio darbo tikslas – sukūrus modelius, grįstus baigtinių skirtumų laiko srities metodu, ištirti galinių ir kraštinių laidininkų netolygumų įtaką meandrinių mikrojuostelinių vėlinimo linijų laiko ir dažnio charakteristikoms, pasiūlyti meandrinių vėlinimo linijų konstrukcijų tobulinimo priemones.

Darbo uždaviniai

Tiksliui pasiekti darbe reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Sudaryti modelius ir ištirti pavienės, susietųjų ir daugialaidžių mikrojuostelinių linijų laiko ir dažnines charakteristikas, taikant baigtinių skirtumų bei baigtinių skirtumų laiko srities analizės metodus.
2. Sudaryti tolygios būdingosios varžos daugialaidžių mikrojuostelinių linijų sintezės ir meandrinių mikrojuostelinių vėlinimo linijų analizės algoritmus bei jų laiko ir dažninių charakteristikų skaičiavimo metodikas.
3. Imitacinių skaičiavimų būdu patikrinti siūlomų LS parametrų skaičiavimo metodų veiksmingumą ir efektyvumą.

Tyrimų metodika

Darbe taikomi elektrodinaminio uždavinio sprendimo metodai, pritaikyti lėtinimo sistemų analizei ir sintezei – tai daugialaidžių linijų, skaitiniai laiko ir dažnio srities metodai. LS kompiuteriniai modeliai ir sukurtieji algoritmai įgyvendinti naudojant programavimo kalbą C, C++, taip pat taikant programų paketą Matlab[®] bei specialios paskirties programų paketus CST Microwave Studio[®] ir Sonnet[®].

Mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją buvo gauti šie elektros ir elektronikos inžinerijos mokslui svarbūs nauji rezultatai:

1. Sukurti baigtinių išmatavimų mikrojuostelinių perdavimo struktūrų modeliai, grįsti baigtinių skirtumų ir baigtinių skirtumų laiko srities metodais, bei ištirtos šių struktūrų elektrinės charakteristikos plačiame dažnių ruože.

2. Taikant daugialaidžių linijų, baigtinių skirtumų ir baigtinių skirtumų laiko srities metodus, sukurti ir įgyvendinti algoritmai, leidžiantys ištirti meandrinę lėtinimo sistemų galinių laidininkų įtaką dažninėms charakteristikoms, kurių rezultatai panaudoti meandrinės tolygios būdingosios varžos LS sintezei.

3. Sudarytas meandrinės mikrojuostelinės lėtinimo sistemos matematinis modelis, grįstas baigtinių skirtumų laiko srities metodu, leidžiantis įvertinti LS kraštinių ir galinių laidininkų netolygumų įtaką sistemos dažninėms charakteristikoms.

Praktinė vertė

Sudarytos analizės ir sintezės skaičiavimo metodikos, leidžiančios projektuoti lėtinimo sistemas, įvertinant sistemose esančius netolygumus – galinių ir kraštinių laidininkų įtaką LS savybėms. Sudaryti daugialaidžių linijų bei baigtinių skirtumų laiko srities metodais grįsti lėtinimo sistemų dažniųjų charakteristikų skaičiavimo algoritmai, leidžiantys sumažinti LS projektavimo proceso trukmę. Sudarytieji modeliai ir pasiūlytieji algoritmai įgyvendinti naudojant C, C++ programavimo kalbas bei programų sistemą Matlab® ir yra taikytini automatizuotose vėlinimo linijų projektavimo sistemose, siekiant padidinti analizės tikslumą ir pagerinti projektuojamų įtaisų charakteristikas.

Ginamieji teiginiai

1. Sudarytasis meandrinės mikrojuostelinės vėlinimo linijos modelis, grįstas baigtinių skirtumų laiko srities metodu, leidžia įvertinti elektromagnetinio lauko sklaidos kraštiniuose ir galiniuose laidininkuose įtaką analizuojamų linijų charakteristikoms ir atskleidė, kad galinių ir reguliariosios srities strypų būdingoji varža gali skirtis daugiau negu 15 %.

2. Pasiūlytasis daugialaidžių mikrojuostelinių linijų sintezės algoritmas leidžia suprojektuoti liniją, kurios signalinių laidininkų būdingosios varžos vertės skiriasi mažiau negu 1 %.

3. Meandrinės mikrojuostelinės vėlinimo linijos, suprojektuotos pagal tolygios būdingosios varžos daugialaidės linijos modelį, pralaidumo juosta iki 20 % platesnė negu linijos, suprojektuotos pagal periodinės daugialaidės linijos modelį.

4. Daugialaidės mikrojuostelinės linijos, veikiančios sinfazinių arba priešfazinių normaliųjų bangų režimu, visais laidininkais sklindančių signalų vėlinimo trukmė skiriasi mažiau negu 1 % plačiame dažnių diapazone.

Darbo apimtis

Darbo apimtis yra 128 puslapiai, tekste panaudota 70 numeruotų formulių, 53 paveikslai ir 18 lentelių. Rašant disertaciją buvo panaudota 115 literatūros šaltinių.

Pirmajame skyriuje pateikiama literatūros analizė, aptariamos lėtinimo sistemų taikymo sritys. Analizuojama lėtinimo įtaisų projektavimo ir sintezės analitiniais, skaitiniais metodais problema. Aptariamas autoriaus indėlis į nagrinėjamos problemos sprendimą. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados ir tikslinami disertacijos uždaviniai.

Antrajame skyriuje parenkami mikrojuostelinių linijų konstrukcinių parametų sintezei naudojami metodai. Sudaromos elektrinių parametų skaičiavimo metodikos ir pateikti tyrimo rezultatai.

Trečiajame skyriuje tiriamos susietųjų ir daugialaidžių mikrojuostelinių linijų matematiniai modeliai, pateikiami tyrimo rezultatai. Sudaromos tolygios ir netolygios būdingosios varžos skaičiavimo ir sintezės metodikos.

Ketvirtajame skyriuje parodoma daugialaidės mikrojuostelinės linijos laidininkų parametų netolygumo įtaka meandrinės mikrojuostelinės vėlinimo linijos charakteristikoms.

Bendrosios išvados

1. Pasiūlyti mikrojuostelinės perdavimo linijos, susietųjų mikrojuostelinių linijų ir daugialaidžių mikrojuostelinių linijų modeliai, grįsti baigtinių skirtumų ir baigtinių skirtumų laiko srities metodais, leidžia tirti reguliarias ir neregulias meandrinės mikrojuostelines vėlinimo linijas, sudarytas iš baigtinio strypų skaičiaus. Sudarytų modelių adekvatumas patikrintas lyginant sudarytais modeliais gautas elektrinių parametų vertes su kitų autorių pateiktais analogiškų parametų matavimų vertėmis.

2. Kompiuteriniais eksperimentais parodyta, kad sudarytieji meandrinės mikrojuostelinės vėlinimo linijos modeliai, grįsti baigtinių skirtumų laiko srities metodu, leidžia įvertinti elektrinio lauko sklaidą laidininkuose ir elektrinių parametų ties laidininkais kitimo pobūdį plačiame dažnių diapazone.

3. Kompiuteriniai tyrimai parodė, kad sinfazinė ir priešfazinė normaliosios bangos negali sklisti vienu metu tam tikros konstrukcijos daugialaidė mikrojuosteline linija, galimas tik vienas iš dviejų darbo režimų. Taigi tolygiosios būdingosios varžos daugialaidė mikrojuostelinė linija gali būti susintezuota tik vienam sužadinimo būdai.

4. Kompiuteriniais eksperimentais parodyta, kad tolygios būdingosios varžos daugialaidžių mikrojuostelinių linijų sintezės algoritmas leidžia suprojektuoti liniją, kurios signalinių laidininkų būdingosios varžos vertės skiriasi mažiau negu 1 %, o tai leidžia gauti meandrinę mikrojuostelinę vėlinimo liniją, kurios pralaidumo juosta iki 20 % platesnė nei linijos, suprojektuotos pagal periodinės daugialaidės linijos modelį.

5. Tyrimai parodė, kad išoriniai daugialaidės mikrojuostelinės linijos laidininkai daro didžiausią įtaką daugialaidės mikrojuostelinės linijos būdingosios varžos tolygumui ir, norint geriau suderinti meandrinę mikrojuostelinę vėlinimo liniją su signalo perdavimo traktu, užtenka keisti tik išorinių meandro strypų plotį.

6. Sudarytas tolygios būdingosios varžos daugialaidės mikrojuostelinės linijos sintezės algoritmas, paremtas baigtinių skirtumų metodo ir susietųjų matricių būdu, leidžia paspartinti meandrinės mikrojuostelinės vėlinimo linijos projektavimą kelis kartus lyginant su algoritmais, grįstais baigtinių skirtumų metodu ir iteraciniu skaičiavimo būdu.

Trumpos žinios apie autorių

Audrius Krukonis gimė 1984 m. rugsėjo 28 d. Vilniuje. 2007 m. įgijo elektronikos inžinerijos bakalauro laipsnį Vilniaus Gedimino technikos universiteto Elektronikos fakultete. 2009 m. įgijo elektronikos inžinerijos mokslo magistro laipsnį Vilniaus Gedimino technikos universiteto Elektronikos fakultete. 2009–2013 m. – Vilniaus Gedimino technikos universiteto doktorantas ir jaunesnysis mokslo darbuotojas. Šiuo metu dirba jaunesniuoju mokslo darbuotoju ir asistentu Vilniaus Gedimino technikos universiteto Elektroninių sistemų katedroje.

Audrius KRUKONIS

INVESTIGATION OF MICROSTRIP DELAY SYSTEMS
IN FREQUENCY AND TIME DOMAIN

Summary of Doctoral Dissertation
Technological Sciences,
Electrical and Electronic Engineering (01T)

Audrius KRUKONIS

MIKROJUOSTELINIŲ LĒTINIMO SISTEMŲ TYRIMAS
DAŽNINIAIS IR LAIKO SRITIES METODAIS

Daktaro disertacijos santrauka
Technologijos mokslai,
Elektros ir elektronikos inžinerija (01T)

2013 10 21. 1,5 sp. l. Tiražas 70 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „Ciklonas“
J. Jasinskio g. 15, 01111 Vilnius