

DAUGIALAIDĖS LINIJOS PARAMETRŲ NETOLYGUMŲ ĮTAKA MEANDRINIŲ VĒLINIMO LINIJŲ DAŽNINĖMS CHARAKTERISTIKOMS

Audrius Krukonis¹, Šarūnas Mikučionis²

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: ¹audrius.krukonis@vgtu.lt; ²sarunas.mikucionis@dok.vgtu.lt

Santrauka. Elektrodinaminių įtaisų, grįstų periodinių daugialaidžių linijų struktūra, kraštuose ir galuose pastebimi elektromagnetinių laukų netolygumai. Straipsnyje nagrinėjama charakteringojo impedanso ir efektyviosios dielektrinės skvarbos netolygumo įtaka meandrinėms mikrojuostelinėms vėlinimo linijoms dažninėms charakteristikoms. Parodyta, kad suvienodinus daugialaidės linijos laidininkų charakteringuosius impedansus arba efektyviasias dielektrines skvarbas galima praplėsti vėlinimo linijos pralaidumo juosta.

Reikšminiai žodžiai: meandrinė mikrojuostelinė vėlinimo linija, daugialaidžių linijų metodas, parametrų netolygumas, pralaidumo juosta, dažninė charakteristika.

Įvadas

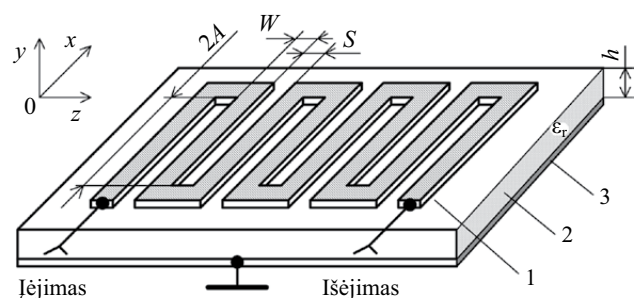
Vėlinimo linijos (VL) plačiai taikomos įvairiose elektroninėse sistemose: pavyzdžiui, analoginiam signalų apdorojimui (Hori *et al.* 2012), analoginiuose skaitmeniniuose keitikliuose (Li *et al.* 2009), signalams sinchronizuoti (Hsu, Wen 2007) ir kaip svarbi įvairių kitų prietaisų dalis (Daškevičius *et al.* 2010; Kim *et al.* 2007).

Šiuo metu plačiai naudojamos iš aktyviųjų elementų sudarytos VL (Kim *et al.* 2007; Wei-Tsung *et al.* 2013). Tačiau elektrodinaminės VL pasižymi tokiais pranašumais: plati, nuo 0 prasidedanti, pralaidumo juosta, charakteristikų tiesiškumas ir stabilumas, mažesnis energijos poreikis (Urbanavičius *et al.* 2009; Katkevičius *et al.* 2012). Elektrodinaminėse VL vėlinimas lemiamas baigtinio elektromagnetinės bangos sklaidimo greičio išilgai nustatyto kelio ir apibūdinamas vėlinimo trukme. Siekiant padidinti vėlinimo trukmę nedidinant VL matmenų, elektromagnetinės bangos sklaidimo kelias ilginamas formuojant meandro arba spiralės formos laidininką. Taip VL struktūra tampa periodinė, turinti savitą meandro strypų arba spiralės kilpų atsikartojimo periodą; todėl tokioms linijoms analizuoti ir modeliuoti plačiai taikomas daugialaidžių linijų metodas (Daškevičius *et al.* 2010). Šis metodas reikalauja palyginti mažai skaičiavimo resursų, o tai ypač svarbu VL sintezei (Katkevičius *et al.* 2012; Štaras *et al.* 2012). Remiantis šiuo metodu, modeliuojama daugialaidė linija, iš kurios

sudaryta VL yra periodinė ir be galo ilga, susidedanti iš be galo daug vienodo pločio laidžiųjų strypų, tarp kurių atstumai taip pat vienodi.

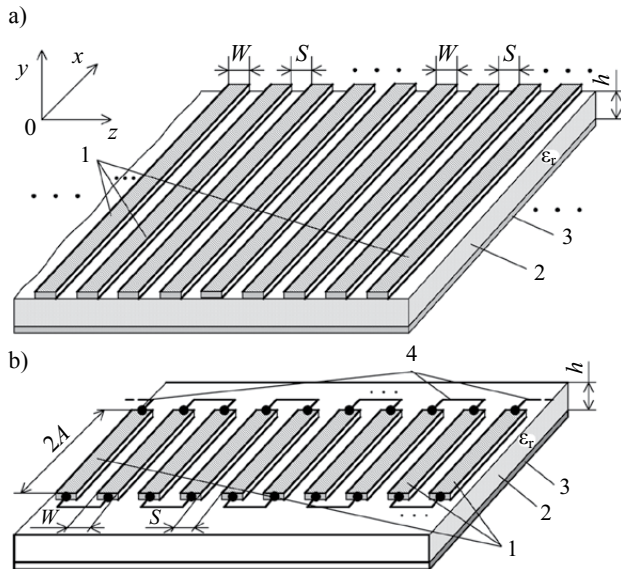
Realių VL, grįstų periodine daugialaide linija ir kurių dydis yra baigtinis, parametrų pasiskirstymas laidininkuose yra netolygus dėl elektromagnetinio lauko sklaidos linijos galuose ir kraštuose (Metlevskis, Urbanavičius 2011).

Šiame straipsnyje nagrinėjama daugialaidės mikrojuostelinės linijos (DLML) laidininkų parametrų netolygumo įtaka meandrinėms mikrojuostelinėms vėlinimo linijoms (MMVL) charakteristikoms. Apibendrinta MMVL sandara pateikta 1 pav.



1 pav. Meandrinės mikrojuostelinės vėlinimo linijos sandara: 1 – signalo laidininkas; 2 – dielektrinis pagrindas; 3 – ekranas
Fig. 1. Structure of microstrip meander delay line: 1 – signal conductor; 2 – dielectric substrate; 3 – shield

Meandrinę mikrojuostelinę vėlinimo liniją sudaro meandro formos signalo laidininkas, suformuotas ant dielektrinio pagrindo, kurio kita pusė dengta laidžiu sluoksniu (ekranu). Remiantis daugialaidžių linijų metodu, tokia MMVL modeliujama pagal DLML, kurios struktūra pavaizduota 2 pav., a. MMVL ir atitinkamos DLML konstrukciniai parametrai yra šie: pagrindo storis h ir santykinė dielektrinė skvarba ϵ_r bei laidininkų pločiai W ir tarpai tarp jų S .



2 pav. Daugialaidės mikrojuostelinės linijos sandara (a) ir jos pagrindu sudarytos meandrinės mikrojuostelinės vėlinimo linijos modelis (b): 1 – linijos laidininkai; 2 – dielektrinis pagrindas; 3 – ekranas; 4 – meandro strypų jungtys

Fig. 2. Structure of multiconductor microstrip line (a) and microstrip meander delay line model based on multiconductor microstrip line (b): 1 – line conductors; 2 – dielectric substrate; 3 – shield; 4 – meander rod connections

Matematiniam modelyje DLML laikoma begaline x ir z kryptimis. Meandrinę struktūrą sudaroma iš DLML atskiriant $2A$ ilgio jos dalį x kryptimi ir atitinkamai sujungiant strypų galus (2 pav., b).

Šiame straipsnyje nagrinėjami dviejų rūšių MMVL, suformuotų iš DLML, netolygumai:

- charakteringojo impedanso netolygumas: $Z_i \neq Z_j$;
- efektyviosios dielektrinės skvarbos netolygumas:

$$\epsilon_{r\text{ef}i} \neq \epsilon_{r\text{ef}j}$$

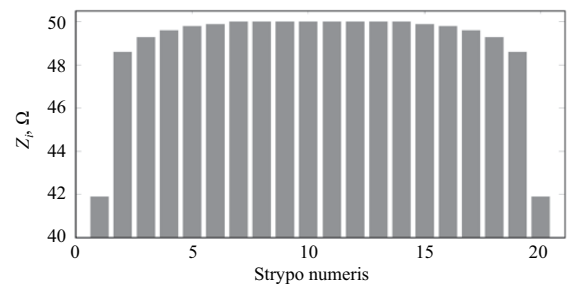
čia i ir j yra MMVL strypų numeriai, $i \neq j$. Šie netolygumai atsiranda dėl vienodo visų meandro strypų pločio.

Toliau glaustai aptariama DLML parametrų netolygumo įtakos MMVL dažninėms charakteristikoms tyrimo metodika. Autorių sukurtais algoritmais sintezuojamos tolygaus charakteringojo impedanso $Z_i = Z_j$ (Pomarnacki, Krukoniš 2011) arba tolygios efektyviosios dielektrinės skvarbos $\epsilon_{r\text{ef}i} = \epsilon_{r\text{ef}j}$ (Mikučionis, Urbanavičius 2011)

DLML. Remiantis sintezuotųjų DLML konstrukciniais parametrais, Sonnet® elektrodinaminių įtaisų modeliavimo terpėje sukuriama atitinkamų MMVL kompiuteriniai modeliai ir randamos jų dažninės charakteristikos. Apskaičiuotos MMVL charakteristikos lyginamos su analogiškų linijų, kurių visų laidininkų pločiai vienodi, t. y. pasireiškia elektromagnetinio lauko sklaida galuose, o atitinkamų DLML elektriniai parametrai yra netolygūs.

Charakteringojo impedanso netolygumo įtaka MMVL charakteristikoms

Siekiant suderinti bet kokią perdavimo liniją, tarp jų ir MMVL, su likusiu signalo perdavimo traktu, MMVL ir perdavimo trakto charakteringieji impedansai turi būti vienodi. Įvade paminėta, kad daugialaide linija grįstos MMVL meandro strypų charakteringieji impedansai yra laikomi vienodais ir strypų pločiai taip pat vienodi (1 pav.). Tačiau MMVL strypų skaičius yra baigtinis, todėl elektrinio lauko struktūra galiniuose laidininkuose yra netolygi, todėl galinių strypų charakteringieji impedansai skiriasi nuo linijos viduryje esančių strypų impedansų (3 pav.). Tokiu atveju signalo perdavimo traktas yra nesuderintas.



3 pav. Meandrinės mikrojuostelinės vėlinimo linijos, grįstos periodine daugialaide mikrojuosteline linija, laidininkų charakteringasis impedansas, kai $\epsilon_r = 9,6$; $h = 0,5$ mm; $W = 0,6$ mm; $S = 0,5$ mm, $2A = 20$ mm, $N = 20$

Fig. 3. Characteristic impedance of conductors of meander microstrip delay line, based on multiconductor microstrip line, when $\epsilon_r = 9.6$; $h = 0.5$ mm; $W = 0.6$ mm; $S = 0.5$ mm, $2A = 20$ mm, $N = 20$

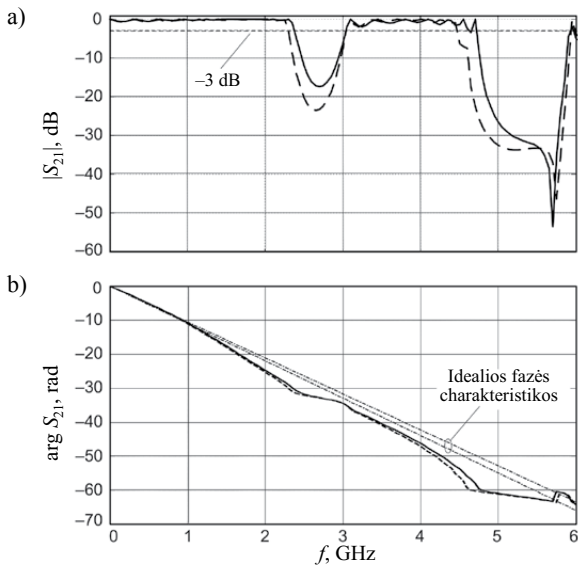
MMVL sklaidos parametro S_{21} dažninė priklausomybė pateikta 4 pav. Iš šios priklausomybės matyti, kad MMVL pasireiškia rezonansas. Šio rezonanso dažnis susijęs su signalo, sklindančio MMVL, bangos ilgiu ir apytiksliai išreiškiamas tokia formule:

$$f_k = \frac{c_0 k}{\sqrt{\epsilon_{r\text{ef}}} (2 \cdot 2A + S)}, \quad (1)$$

čia: c_0 – šviesos greitis vakuume; k – rezonanso eilės numeris; $\epsilon_{r\text{ef}}$ – DLML efektyvioji dielektrinė skvarba; $2A$ ir S – meandro struktūros dydžiai (1 pav.). Tolygaus charakteringojo impedanso MMVL rezonansas yra šiek

ties pasislinkęs aukštesniųjų dažnių link (taip praplatėja ir pralaidumo juosta), lyginant su atitinkama netolygaus charakteringojo impedanso MMVL. Šis rezonanso poslinkis paaiškinamas tuo, kad tolygaus impedanso MMVL siauresnių galinių strypų efektyvioji dielektrinė skvarba yra mažesnė, todėl rezonanso dažnis pagal (1) yra aukštesnis.

Tačiau MMVL pralaidumo juosta yra vertinama pagal fazės charakteristikos nuokrypius, o ne pagal amplitudės. Pavyzdžiui, tolygaus impedanso MMVL pralaidumo juosta, nustatyta pagal amplitudės dažninę charakteristiką (S_{21} modulis, o sumažėjimas 3 dB) (4 pav., a), lygi 2,38 GHz, o nustatyta pagal fazės dažninę charakteristiką (S_{21} argumentas, o nuokrypis nuo tiesės per 0,5 rad) (4 pav., b) – tik 1,05 GHz. Todėl tolesnėje MMVL analizėje pralaidumo juosta bus laikomas dažnių ruožas, kuriame fazės charakteristikos nuokrypis nuo idealios fazės charakteristikos ne didesnis nei 0,5 rad.



4 pav. MMVL perdavimo charakteristikos (S_{21} parametro): a) modulis, b) argumentas (fazė), kai $\epsilon_r = 9,6$; $h = 0,5$ mm; $2A = 20$ mm; $N = 10$. Vientisos kreivės – tolygaus charakteringojo impedanso; brūkšninės kreivės – netolygaus charakteringojo impedanso MMVL

Fig. 4. MMDL transfer characteristic's (parameter S_{21}) magnitude (a) and phase (b), when $\epsilon_r = 9.6$; $h = 0.5$ mm; $2A = 20$ mm; $N = 10$. Solid curves correspond the uniform characteristic impedance, and dashed ones correspond the non-uniform characteristic impedance of MMDL

Vėlinimo trukmė t_d ir praleidžiamųjų dažnių juostos plotis ΔF yra pagrindinės MMVL charakteristikos. Pagrindo dielektrinė skvarba ϵ_r , meandro strypų skaičius N ir jų ilgis $2A$ labiausiai veikia minėtąsias charakteristikas. Taip pat paminėtina, kad vėlinimo trukmė t_d ir juostos plotis ΔF yra atvirkščiai proporcingi, t. y., keičiant MMVL konstrukcinius parametrus, siekiant padidinti vėlinimo trukmę, pralaidumo juosta siaureja, atvirkštinis teiginys taip pat

teisingas. Todėl, siekiant įvertinti konstrukcinių parametų įtaką MMVL charakteristikoms, naudojamas integruotas vėlinimo linijų įvertis – vadinamasis D faktorius, kuris išreiškiamas kaip vėlinimo trukmės ir pralaidumo juostos sandauga:

$$D_{(u, u-n)} = t_{d(u, u-n)} \cdot \Delta F_{(u, u-n)}. \quad (2)$$

Čia apatinis indeksas u reiškia tolygių parametų MMVL (tolygaus charakteringojo impedanso arba efektyviosios skvarbos), indeksas $n-u$ – netolygių parametų MMVL.

Pirmojoje pristatomų tyrimų dalyje nagrinėjama MMVL strypų charakteringojo impedanso suvienodinimo įtaka elektrinėms charakteristikoms. Tolygaus ir netolygaus charakteringųjų impedansų MMVL charakteristikų priklausomybė nuo linijos konstrukcinių parametų pateikta 1–4 lentelėse. Šiose lentelėse taip pat pateikiami santykiniai skirtumai.

Vėlinimo trukmės santykinis skirtumas:

$$\delta t_d = \frac{t_{d(u)} - t_{d(n-u)}}{t_{d(n-u)}} 100 \%, \quad (3)$$

čia $t_{d(u)}$ – tolygių parametų MMVL vėlinimo trukmė; $t_{d(n-u)}$ – netolygių parametų MMVL vėlinimo trukmė.

Pralaidumo juostos santykinis skirtumas:

$$\delta \Delta F = \frac{\Delta F_{(u)} - \Delta F_{(n-u)}}{\Delta F_{(n-u)}} 100 \%, \quad (4)$$

čia $\Delta F_{(u)}$ – tolygių parametų MMVL pralaidumo juosta; $\Delta F_{(n-u)}$ – netolygių parametų MMVL pralaidumo juosta.

D faktoriaus santykinis skirtumas:

$$\delta D = \frac{D_{(u)} - D_{(n-u)}}{D_{(n-u)}} 100 \%, \quad (5)$$

čia $D_{(u)}$ – tolygių parametų MMVL D faktorius; $D_{(n-u)}$ – netolygių parametų MMVL D faktorius.

Iš 1–4 lentelių matyti, kad esant analogiškiems konstrukciniams parametrams, tolygaus impedanso MMVL vėlinimo trukmė $t_{d(u)}$ visais atvejais mažesnė nei netolygaus impedanso MMVL. Šis skirtumas atsiranda dėl tolygaus impedanso MMVL siauresnių galinių strypų mažesnės efektyviosios dielektrinės skvarbos.

MMVL, sudarytos iš didesnio skaičiaus strypų N , vėlinimo trukmė beveik proporcingai N yra didesnė (1 lentelė). Na o MMDL, turinčios daugiau strypų, pralaidumo juosta yra daug siauresnė. Atlikti tyrimai parodė, kad strypų impedansų suvienodinimas duoda teigiamą efektą tik esant didesniai strypų skaičiui N . 1 lentelėje matyti, kad, kai $N = 20$, tolygaus impedanso MMVL pralaidumo juosta yra 20 % platesnė nei analogiškos netolygaus impe-

danso MMVL; tolygaus impedanso MMVL D faktorius šiuo atveju taip pat didesnis 16 % nei atitinkamos netolygaus impedanso MMVL.

MMVL vėlinimo trukmė taip pat beveik proporcingai didėja, didinant meandro strypų ilgį $2A$ (2 lentelė). Tačiau pralaidumo juosta šiuo atveju beveik proporcingai mažėja. Iš 2 lentelės matyti, kad tolygaus impedanso MMVL pralaidumo juosta daugeliu atvejų didesnė nei netolygaus impedanso MMVL. Tik esant itin dideliame meandro aukščiui ($2A = 40$ mm, arba $2A/h = 80$), t. y., kai silpnėja meandro kraštų netolygumo įtaka, tolygaus ir netolygaus impedanso MMVL pralaidumo juostos pločiai sutampa. Tolygaus impedanso MMVL D faktorius 16 % didesnis nei netolygaus impedanso MMVL (išskyrus minėtą atvejį, kai $2A/h = 80$).

1 lentelė. Tolygaus ir netolygaus charakteringojo impedanso MMVL charakteristikų priklausomybė nuo meandro strypų skaičiaus N , kai $\epsilon_r = 9,6$; $h = 0,5$ mm; $2A = 20$ mm

Table 1. Dependence of characteristics of the uniform and non-uniform characteristic impedance MMDL on number of the meander strips N ($\epsilon_r = 9.6$; $h = 0.5$ mm; $2A = 20$ mm)

| MMVL charakteristika | Meandro strypų skaičius, N | | | | |
|--------------------------|------------------------------|-------|-------|------|-------|
| | 3 | 5 | 10 | 20 | 40 |
| $t_{d(u)}$, ns | 0,46 | 0,87 | 1,68 | 3,3 | 6,54 |
| $t_{d(n-u)}$, ns | 0,52 | 0,92 | 1,75 | 3,4 | 6,69 |
| δt_d , % | -11 | -6 | -3,8 | -2,9 | -2,2 |
| $\Delta F_{(u)}$, GHz | 1,3 | 1,2 | 1,05 | 0,3 | 0,14 |
| $\Delta F_{(n-u)}$, GHz | 1,55 | 1,3 | 1,15 | 0,25 | 0,13 |
| δF , % | -16 | -8 | -9 | 20 | 7,7 |
| $D_{(u)}$ | 0,598 | 1,044 | 1,764 | 0,99 | 0,916 |
| $D_{(n-u)}$ | 0,806 | 1,196 | 2,013 | 0,85 | 0,87 |
| δD , % | -26 | -13 | -12 | 16 | 5,3 |

2 lentelė. Tolygaus ir netolygaus charakteringojo impedanso MMVL charakteristikų priklausomybė nuo meandro strypų ilgio $2A$, kai $\epsilon_r = 9,6$; $h = 0,5$ mm; $N = 20$

Table 2. Dependence of characteristics of the uniform and non-uniform characteristic impedance MMDL on height of the meander strips $2A$ ($\epsilon_r = 9.6$; $h = 0.5$ mm; $N = 20$)

| MMVL charakteristika | Meandro strypų ilgis $2A$, mm | | |
|--------------------------|--------------------------------|------|-------|
| | 10 | 20 | 40 |
| $t_{d(u)}$, ns | 1,8 | 3,3 | 6,3 |
| $t_{d(n-u)}$, ns | 1,89 | 3,4 | 6,4 |
| δt_d , % | -4,5 | -2,9 | -2 |
| $\Delta F_{(u)}$, GHz | 0,55 | 0,3 | 0,15 |
| $\Delta F_{(n-u)}$, GHz | 0,45 | 0,25 | 0,15 |
| δF , % | 22 | 20 | 0 |
| $D_{(u)}$ | 0,99 | 0,99 | 0,945 |
| $D_{(n-u)}$ | 0,851 | 0,85 | 0,96 |
| δD , % | 16,4 | 16 | -1,6 |

Vėlinimo trukmė gali būti didinama, nedidinant MMVL konstrukcijos dydžio, parenkant didesnės dielektrinės skvarbos pagrindą (3 lentelė). Svarbu paminėti, kad, padidinus pagrindo skvarbą apie 70 % ($16/9,6 \cong 1,7$), paliekant kitus konstrukcinius parametrus pastovius, vėlinimo trukmė padidėja tik 25 % ($4,12/3,3 \cong 1,24$). Tačiau pralaidumo juostos plotis mažėja apie 50 % ($0,55/0,25 \cong 2,2$). Kai kurios tolygaus impedanso MMVL charakteristikos keičiasi daugiau neigiama linkme, lyginant su netolygaus impedanso MMVL. Pavyzdžiui, didinant pagrindo skvarbą, kaip anksčiau minėtame pavyzdyje, 70 %, tolygaus impedanso D faktorius mažėja 20 % ($0,99/0,824 \cong 1,2$), o netolygaus impedanso MMVL D faktorius išlieka beveik nepakitęs.

3 lentelė. Tolygaus ir netolygaus charakteringojo impedanso MMVL charakteristikų priklausomybė nuo dielektrinio pagrindo skvarbos ϵ_r , kai $h = 0,5$ mm; $2A = 20$ mm; $N = 20$

Table 3. Dependence of characteristics of the uniform and non-uniform characteristic impedance MMDL on permittivity of the dielectric substrate ϵ_r ($h = 0.5$ mm; $2A = 20$ mm; $N = 20$)

| MMVL charakteristika | Dielektrinio pagrindo skvarba, ϵ_r | | |
|--------------------------|---|------|-------|
| | 4,5 | 9,6 | 16 |
| $t_{d(u)}$, ns | 2,5 | 3,3 | 4,12 |
| $t_{d(n-u)}$, ns | 2,59 | 3,4 | 4,2 |
| δt_d , % | -3,3 | -2,9 | -1,9 |
| $\Delta F_{(u)}$, GHz | 1,25 | 0,3 | 0,2 |
| $\Delta F_{(n-u)}$, GHz | 0,55 | 0,25 | 0,2 |
| δF , % | 127 | 20 | 0 |
| $D_{(u)}$ | 3,125 | 0,99 | 0,824 |
| $D_{(n-u)}$ | 1,425 | 0,85 | 0,84 |
| δD , % | 120 | 16 | -1,9 |

4 lentelė. Tolygaus ir netolygaus charakteringojo impedanso MMVL charakteristikų priklausomybė nuo tarpo tarp meandro strypų dydžio S , kai $\epsilon_r = 9,6$; $h = 0,5$ mm; $2A = 20$ mm; $N = 20$

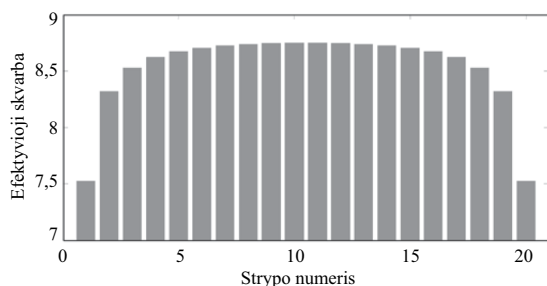
Table 4. Dependence of characteristics of the uniform and non-uniform characteristic impedance MMDL on space between the meander strips S ($\epsilon_r = 9.6$; $h = 0.5$ mm; $2A = 20$ mm; $N = 20$)

| MMVL charakteristika | Tarpas tarp meandro strypų, S , mm | | | |
|--------------------------|--------------------------------------|------|-------|-------|
| | 0,25 | 0,5 | 1,0 | 2,0 |
| $t_{d(u)}$, ns | 3,11 | 3,3 | 3,56 | 3,78 |
| $t_{d(n-u)}$, ns | 3,26 | 3,4 | 3,61 | 3,79 |
| δt_d , % | -4,4 | -2,9 | -1,4 | -0,33 |
| $\Delta F_{(u)}$, GHz | 0,15 | 0,3 | 1,05 | 1,1 |
| $\Delta F_{(n-u)}$, GHz | 0,15 | 0,25 | 1,0 | 1,1 |
| δF , % | 0 | 20 | 5,0 | 0 |
| $D_{(u)}$ | 0,467 | 0,99 | 3,738 | 4,158 |
| $D_{(n-u)}$ | 0,489 | 0,85 | 3,61 | 4,169 |
| δD , % | -4,6 | 16 | 3,6 | -0,26 |

MMVL pralaidumo juosta gali būti praplatinta, nemažinant vėlinimo trukmės, padidinant tarpus tarp meandro strypų S . MMVL charakteristikų priklausomybė nuo tarpo tarp strypų pločio pateikta 4 lentelėje. Šio dydžio keitimas daro didelę įtaką MMVL charakteristikoms. Pavyzdžiui, padidinus tarpą 4 kartus (nuo 0,25 mm iki 1 mm), pralaidumo juosta plėtėja 7 kartus ($1,05/0,15 \approx 7$). Taip pat pažymėtina, kad tolygaus impedanso MMVL charakteristikos yra jautresnės tarpo tarp strypų pokyčiui nei netolygaus impedanso MMVL. Pavyzdžiui, didinant tarpą du kartus, tolygaus impedanso MMVL D faktorius didėja $0,99/0,467 = 2,5$ karto, o netolygaus impedanso MMVL D faktorius šiuo atveju didėja tik $0,85/0,489 \approx 1,7$ karto (tolygaus impedanso MMVL šiuo atveju yra 20 % jautresnė už netolygaus impedanso MMVL).

Fazinio greičio skirtumų įtaka MMVL charakteristikoms

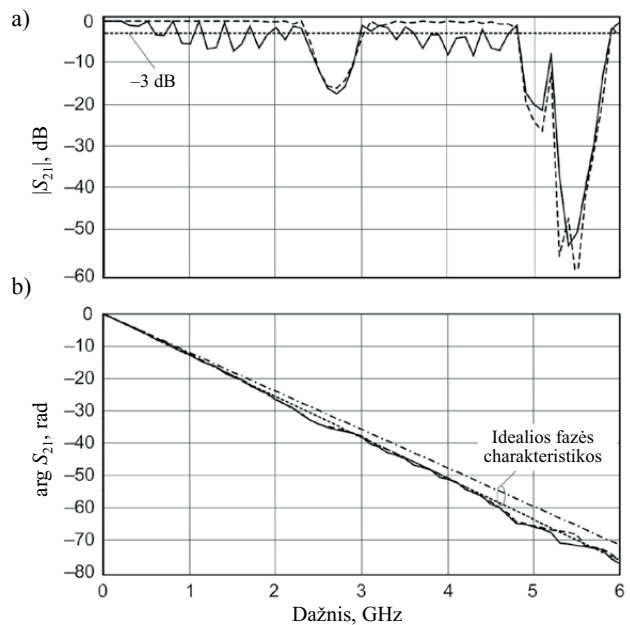
Bendruoju atveju DLML, sudarytoje iš N signalinių laidininkų, gali sklirti N modų (normaliųjų bangų) (Paul 2008). Taikant DLML modelį meandrinėms vėlinimo linijoms projektuoti, svarbios dvi modos: sinfazinė (lyginė) ir priešfazinė (nelyginė). Priešfazinė moda MMVL analizei naudojama aukštesniame linijos veikimo dažnyje nei pralaidumo juosta, kai fazių skirtumas gretimuose meandro strypuose lygus $(2k + 1)\pi$, čia $k = 0, 1, 2, 3, \dots$. Projektuojant MMVL, siekiant rasti topologijos matmenis, užtenka rasti DLML parametrus sinfazinei modai. Sinfazinės modos atveju vienodos amplitudės ir ženklo signalai sklinda linijos laidininkais vienodu greičiu. Tai įmanoma tik tuo atveju, kai efektyvioji dielektrinė skvarba vienoda visiems laidininkams sinfazinės modos atveju. Ši savybė yra savaiminė begalinės ir periodinės DLML atveju. Baigtinio dydžio DLML atveju skirtingų laidininkų efektyvioji dielektrinė skvarba yra skirtinga (5 pav.). Toks efektyviosios skvarbos netolygumas veikia vėlinimo linijos charakteristikas, tarp jų vėlinimo trukmę ir pralaidumo juostą (6 pav.).



5 pav. DLML, grįžtos MMVL, laidininkų efektyvioji dielektrinė skvarba, kai $\epsilon_r = 9,6$; $h = 0,5$ mm; $W = 0,6$ mm; $S = 0,5$ mm; $2A = 20$ mm; $N = 20$

Fig. 5. Effective dielectric constant of MMDL conductors, based on MMVL, when $\epsilon_r = 9.6$; $h = 0.5$ mm; $W = 0.6$ mm; $S = 0.5$ mm; $2A = 20$ mm; $N = 20$

Siekiant suvienodinti efektyviasias dielektrines skvarbas sinfazinei modai, galiniai DLML laidininkai turi būti platesni už vidinius (Mikučionis, Urbanavičius 2011). Tačiau platesnių laidininkų charakteringieji impedansai labai skiriasi nuo likusiųjų laidininkų ir kitų perdavimo linijų charakteringųjų impedansų, todėl linija tampa nesuderinta. Dėl šio nesuderinimo amplitudės dažninėje charakteristikoje atsiranda dideli svyravimai, didesni nei 3 dB dar iki rezonanso, aprašyto (1) išraiška (6 pav.). MMVL, sudarytos pagal sinfazinės (t. y. esant vienodoms sinfazinės modos laidininkų efektyviosioms skvarboms) DLML modelį, faziniai nuokrypiai mažesni nei linijos, kurios visi laidininkai vienodo pločio (6 pav., b). Nepaisant to, dėl amplitudės dažninės charakteristikos svyravimų tolygios efektyviosios skvarbos MMVL pralaidumo juostą lemia amplitudės charakteristika, o netolygios skvarbos MMVL (t. y. esant vienodo pločio meandro strypams) lemia fazės dažninė charakteristika.



6 pav. MMVL perdavimo charakteristikos (S_{21} parametro): a) modulis, b) argumentas (fazė), kai $\epsilon_r = 9,6$; $h = 0,5$ mm; $2A = 20$ mm; $N = 10$. Vientisos kreivės – tolygios efektyviosios skvarbos; brūkšninės kreivės – netolygios efektyviosios skvarbos MMVL

Fig. 6. MMDL transfer characteristic's (parameter S_{21}) magnitude (a) and phase (b), when $\epsilon_r = 9.6$; $h = 0.5$ mm; $2A = 20$ mm; $N = 10$. Solid curves correspond the uniform effective dielectric constant, and dashed ones correspond the non-uniform effective dielectric constant of MMDL

Tolygios efektyviosios dielektrinės skvarbos MMVL vėlinimo trukmė visais nagrinėtais atvejais didesnė nei MMVL su vienodo pločio strypais (5–8 lentelės). Pralaidumo juosta dėl charakteringojo impedanso nesude-

rinimo tolygios efektyviosios dielektrinės skvarbos MMVL atveju beveik visais nagrinėtais atvejais buvo mažesnė nei netolygios efektyviosios dielektrinės skvarbos MMVL.

Didinant meandro strypų skaičių, atitinkamai ilgėja MMVL vėlinimo trukmė (5 lentelė). Nepaisant to, dėl mažos pralaidumo juostos tolygios efektyviosios dielektrinės skvarbos MMVL D faktorius yra iki 42 % mažesnis nei skirtingos efektyviosios dielektrinės skvarbos MMVL. Tik daugiausiai strypų ($N = 20$) turinčios nagrinėtos MMVL atveju šis skirtumas buvo palyginti nedidelis – 11 %.

MMVL vėlinimo trukmė taip pat gali būti keičiama, keičiant meandro strypų ilgį (6 lentelė) ir (arba) parenkant dielektrinio pagrindo skvarbą (7 lentelė).

5 lentelė. Tolygios ir netolygios efektyviosios dielektrinės skvarbos MMVL charakteristikų priklausomybė nuo strypų skaičiaus, kai $\epsilon_r = 9,6$; $h = 0,5$ mm; $2A = 20$ mm

Table 5. Dependence of characteristics of the uniform and non-uniform effective dielectric constant in MMDL on number of the meander strips ($\epsilon_r = 9.6$; $h = 0.5$ mm; $2A = 20$ mm; $N = 20$)

| MMVL charakteristika | Meandro strypų skaičius | | | |
|--------------------------|-------------------------|-------|-------|-------|
| | 3 | 5 | 10 | 20 |
| $t_{d(u)}$, ns | 0,706 | 1,05 | 2,01 | 3,64 |
| $t_{d(n-u)}$, ns | 0,642 | 0,948 | 1,88 | 3,42 |
| δt_{d^2} , % | 10 | 11 | 6,9 | 6,4 |
| $\Delta F_{(u)}$, GHz | 1,1 | 0,63 | 0,5 | 0,5 |
| $\Delta F_{(n-u)}$, GHz | 1,5 | 1,2 | 0,91 | 0,6 |
| δF , % | -27 | -48 | -45 | -17 |
| $D_{(u)}$ | 0,777 | 0,662 | 1,005 | 1,82 |
| $D_{(n-u)}$ | 0,963 | 1,138 | 1,71 | 2,052 |
| δD , % | -19 | -42 | -41 | -11 |

6 lentelė. Tolygios ir netolygios efektyviosios dielektrinės skvarbos MMVL charakteristikų priklausomybė nuo strypų ilgio $2A$, kai $\epsilon_r = 9,6$; $h = 0,5$ mm; $N = 20$

Table 6. Dependence of characteristics of the uniform and non-uniform effective dielectric constant in MMDL on height of the meander strips $2A$ ($\epsilon_r = 9.6$; $h = 0.5$ mm; $N = 20$)

| MMVL charakteristika | Meandro strypų ilgis $2A$, mm | | |
|--------------------------|--------------------------------|-------|-------|
| | 10 | 20 | 40 |
| $t_{d(u)}$, ns | 2,12 | 3,64 | 6,91 |
| $t_{d(n-u)}$, ns | 2,04 | 3,42 | 6,63 |
| δt_{d^2} , % | 3,9 | 6,4 | 4,2 |
| $\Delta F_{(u)}$, GHz | 1,0 | 0,5 | 0,3 |
| $\Delta F_{(n-u)}$, GHz | 1,3 | 0,6 | 0,3 |
| δF , % | -23 | -17 | 0 |
| $D_{(u)}$ | 2,12 | 1,82 | 2,073 |
| $D_{(n-u)}$ | 2,652 | 2,052 | 1,989 |
| δD , % | -20 | -11 | 4,2 |

Autorių atlikti skaičiavimai parodė, kad, keičiant meandro strypų ilgį $2A$ ir pagrindo skvarbą ϵ_r , MMVL charakteristikos keičiasi panašiai. Tolygios efektyviosios skvarbos MMVL pralaidumo juosta daugeliu nagrinėtųjų atvejų yra siauresnė nei netolygios efektyviosios skvarbos MMVL. Tik kai $2A = 40$ mm (6 lentelė) ir $\epsilon_r = 16$ (7 lentelė), abiejų linijų pralaidumo juosta yra vienoda. Nagrinėtųjų linijų D faktorius šiuo atveju kinta panašiai.

8 lentelėje pateikta tarpo tarp meandro strypų pločio įtaka tolygios ir netolygios efektyviosios dielektrinės skvarbos MMVL charakteristikoms. Didinant tarpą tarp gretimų meandro strypų, beveik proporcingai didėja MMVL pralaidumo juosta, o vėlinimo trukmė praktiškai nesikeičia.

7 lentelė. Tolygios ir netolygios efektyviosios dielektrinės skvarbos MMVL charakteristikų priklausomybė nuo dielektrinio pagrindo skvarbos ϵ_r , kai $h = 0,5$ mm; $2A = 20$ mm; $N = 20$

Table 7. Dependence of characteristics of the uniform and non-uniform effective dielectric constant in MMDL on permittivity of the dielectric substrate ϵ_r ($h = 0.5$ mm; $2A = 20$ mm; $N = 20$)

| MMVL charakteristika | Dielektrinio pagrindo skvarba ϵ_r | | |
|--------------------------|--|-------|-------|
| | 4,5 | 9,6 | 16 |
| $t_{d(u)}$, ns | 2,62 | 3,64 | 5,1 |
| $t_{d(n-u)}$, ns | 2,61 | 3,42 | 4,78 |
| δt_{d^2} , % | 0,38 | 6,4 | 6,7 |
| $\Delta F_{(u)}$, GHz | 1,5 | 0,5 | 0,3 |
| $\Delta F_{(n-u)}$, GHz | 1,6 | 0,6 | 0,3 |
| δF , % | -6,3 | -17 | 0 |
| $D_{(u)}$ | 3,93 | 1,82 | 1,53 |
| $D_{(n-u)}$ | 4,176 | 2,052 | 1,434 |
| δD , % | -5,9 | -11 | 6,7 |

8 lentelė. Tolygios ir netolygios efektyviosios dielektrinės skvarbos MMVL charakteristikų priklausomybė nuo tarpo tarp meandro strypų dydžio N , kai $\epsilon_r = 9,6$; $h = 0,5$ mm; $2A = 20$ mm; $N = 20$

Table 8. Dependence of characteristics of the uniform and non-uniform effective dielectric constant in MMDL on number of the meander strips N ($\epsilon_r = 9.6$; $h = 0.5$ mm; $2A = 20$ mm; $N = 20$)

| MMDL charakteristika | Tarpas tarp meandro strypų S , mm | | |
|--------------------------|-------------------------------------|-------|-------|
| | 0,5 | 1,0 | 2,0 |
| $t_{d(u)}$, ns | 3,76 | 3,64 | 3,99 |
| $t_{d(n-u)}$, ns | 3,11 | 3,42 | 3,96 |
| δt_{d^2} , % | 21 | 6,4 | 0,76 |
| $\Delta F_{(u)}$, GHz | 0,2 | 0,5 | 1,1 |
| $\Delta F_{(n-u)}$, GHz | 0,6 | 0,6 | 1,0 |
| δF , % | -67 | -17 | 10 |
| $D_{(u)}$ | 0,752 | 1,82 | 4,389 |
| $D_{(n-u)}$ | 1,866 | 2,052 | 3,96 |
| δD , % | -60 | -11 | 11 |

Kaip ir ankstesniais atvejais, tolygios efektyviosios skvarbos MMVL D faktorius yra mažesnis nei netolygios efektyviosios skvarbos MMVL. Tik esant santykinai dideliui tarpui tarp meandro strypų ($S = 2$ mm) tolygios efektyviosios skvarbos MMVL turi geresnes charakteristikas.

Išvados

Šiame straipsnyje buvo nagrinėta daugialaidės mikrojuostelinės linijos (DLML) elektrinių parametrų – charakteringojo impedanso ir efektyviosios dielektrinės skvarbos – netolygumų įtaka meandrinėms mikrojuostelinėms vėlinimo linijoms (MMVL) charakteristikoms: vėlinimo trukmei ir pralaidumo juostai. Siekiant šio tikslo atlikti imitaciniai kompiuteriniai eksperimentai su skirtingomis MMVL topologijomis ir skirtingais dielektrikais.

Atlikti skaičiavimai parodė, kad MMVL, grįstos tolygaus charakteringojo impedanso DLML modeliu, yra geriau suderintos su signalo perdavimo traktu. Todėl jų pralaidumo juosta platesnė nei netolygaus impedanso MMVL. Tačiau vėlinimo trukmė tolygaus charakteringojo impedanso MMVL atveju visada mažesnė nei atitinkamų konstrukcinių parametrų netolygaus impedanso MMVL.

Efektyviosios dielektrinės skvarbos DLML suvienodinamos platinant galinius laidininkus. Todėl tolygios efektyviosios skvarbos MMVL vėlinimo trukmė visuomet didesnė ir faziniai nuokrypiai mažesni nei atitinkamos netolygios efektyviosios skvarbos MMVL. Tačiau dėl prastesnio impedansų suderinimo su likusiu signalo traktu tolygios dielektrinės skvarbos MMVL pralaidumo juosta yra siauresnė nei netolygios efektyviosios skvarbos MMVL.

Literatūra

- Daškevičius, V.; Skudutis, J.; Katkevičius, A.; Štaras, S. 2010. Simulation and properties of the wide-band hybrids low-wave system, *Electronics and Electrical Engineering* 104(8): 43–46.
- Horii, Y.; Gupta, S.; Nikfal, B.; Caloz, C. 2012. Multilayer broadside-coupled dispersive delay structures for analog signal processing, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters* 22(1): 1–3. <http://dx.doi.org/10.1109/LMWC.2011.2176476>
- Hsu, H.; Wen, J. 2007. Timing synchronization in ultra-wide band systems with delay line combination receivers, *IEEE Communications Letters* 11(3): 264–266. <http://dx.doi.org/10.1109/LCOMM.2007.061765>
- Katkevičius, A.; Mališauskas, V.; Plonis, D.; Serackis, A. 2012. Calculations of characteristics of microwave devices using artificial neural networks, *Electrical Review* 88(1a): 281–285.
- Kim, H.; Bien, F.; Hur, Y.; Chandramouli, S.; Cha, J.; Gebara, E.; Laskar, J. 2007. A 0.25- μ m BiCMOS feed forward equalizer

using active delay line for back plane communication, in *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, 27–30 May, 2007, New Orleans, USA, 193–196.

- Li, G.; Touse, Y. M.; Hassibi, A.; Afshari, E. 2009. Delay-line-based analog-to-digital converters, *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs* 56(6): 464–468. <http://dx.doi.org/10.1109/TCSII.2009.2020947>
- Metlevskis, E.; Urbanavičius, V. 2011. Analysis of charge distribution on rectangular microstrip structures, *Acta Physica Polonica A* 119(4): 503–508.
- Mikučionis, Š.; Urbanavičius, V. 2011. Synthesis of six-conductors symmetrically coupled microstrip line, operating in a normal mode, *Elektronika ir elektrotechnika* 110(4): 47–52.
- Paul, C. R. 2008. *Analysis of multiconductor transmission lines*. New York: Wiley-IEEE Press. 780 p.
- Pomarnacki, R.; Krukoniš, A. 2011. Parallel algorithm for the quasi-TEM analysis of microstrip multiconductor line, *Mokslas – Lietuvos ateitis* 3(1): 104–109.
- Štaras, S.; Martavičius, R.; Skudutis, J.; Urbanavičius, V.; Daškevičius, V. 2012. *Wide-band slow-wave systems: simulation and application*. New York: Taylor&Francis Group. 460 p.
- Urbanavičius, V.; Gurskas, A.; Martavičius, R. 2009. Simulation of the meander delay line using the hybrid method, *Electronics and Electrical Engineering* 90(2): 6–9.
- Wei-Tsung, L.; Yun-Chieh, C.; Jeng-Han, T.; Hong-Yuan, Y.; Jen-Hao, C.; Tian-Wei, H. 2013. 60-GHz 5-bit phase shifter with integrated VGA phase-error compensation, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 61(3): 1224–1235. <http://dx.doi.org/10.1109/TMTT.2013.2244226>

EFFECT OF NON-UNIFORMITY OF THE MULTICONDUCTOR LINE CONSTRUCTIONAL PARAMETERS ON THE FREQUENCY CHARACTERISTICS OF THE MEANDER MICROSTRIP DELAY LINE

A. Krukoniš, Š. Mikučionis

Abstract

Inhomogeneities of the electromagnetic field are observed at the edges of the electrodynamic delay systems which are designed based on the concept of infinite periodic multiconductor line. The influence of non-uniformity of characteristic impedance and effective permittivity of the multiconductor microstrip line on the frequency responses and characteristics of meander microstrip delay lines is studied in this paper. It is shown that aligning characteristic impedance and effective permittivity of the multiconductor line the bandwidth of the delay line can be significantly extended.

Keywords: meander microstrip delay line, multiconductor line method, non-uniformity of parameters, bandwidth, frequency response.