

УДК 621.396.41

Н.Д. Малютин, А.Г. Лошилов, Е.И. Тренкаль, В.Н. Федоров

## Полосковые управляемые меандровые линии задержки

Приведены результаты исследования компактных управляемых меандровых линий задержки. Устройства построены в виде отрезков связанных линий с сильно неуравновешенной электромагнитной связью. Такие структуры при управлении параметрами имеют по крайней мере два состояния с одинаковым характеристическим сопротивлением, что позволяет управлять задержкой импульсных сигналов, сохраняя согласование с внешними цепями и обеспечивая низкий уровень потерь.

**Ключевые слова:** связанные полосковые линии, меандровые линии, управление временем задержки, неуравновешенная электромагнитная связь.

Полосковые линии передачи, свернутые в меандр, позволяют сократить размеры устройств, предназначенных для коррекции зависимости группового времени запаздывания от частоты  $\tau(f)$  [1, 2]. Другие применения меандровых линий с ограниченными размерами витков: выравнивание времени задержки каналов распространения импульсов [3–11]; возбуждения рупорных антенн [12]; построение плавных и дискретных фазовращателей [14–17]; уменьшения размеров резонаторов селективных фильтров на основе ВТСП материалов [16] и др.

В данной работе рассмотрены управляемые линии задержки, содержащие полосковый меандровый проводник, связанный со сплошной полоской, и регулирующие элементы [16]. Такая структура имеет ряд особенностей, дающих возможность уменьшить размеры устройства при сохранении согласования при управлении параметрами с внешними цепями в широкой полосе частот [17].

**Конструкция полосковой структуры и схема управления.** Конструкция полосковой структуры, примененной для построения управляемых меандровых линий задержки, рассмотрена в работе [14] (рис. 1). Она включает меандровую линию 1 на подложке 2, связанную со сплошной полоской 4 на подложке 3, находящуюся под «плавающим» потенциалом, и экраны 5 и 6 (см. рис. 1). Показано, что изменение потенциала на полоске 4 путем шунтирования ее с помощью емкостей приводит к изменению фазового сдвига. Это свойство использовано для конструирования фазовращателей.

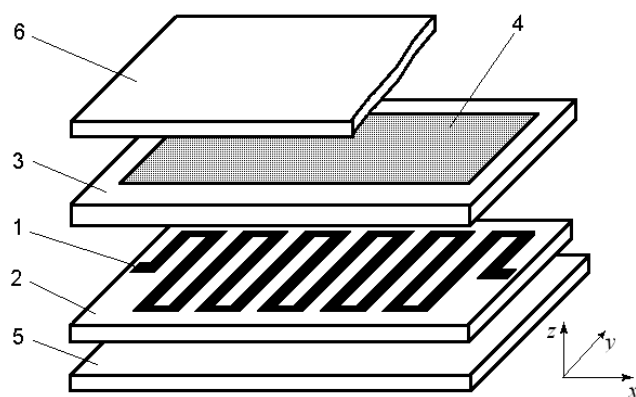


Рис. 1. Конструкция полосковой структуры типа «меандровая линия, связанная со сплошной полоской»: 1 – меандровая линия; 2, 3 – подложки из диэлектрика; 4 – сплошная (управляющая) полоска, перекрывающая меандровый проводник, находящаяся под «плавающим» потенциалом; 5, 6 – экранирующие пластины

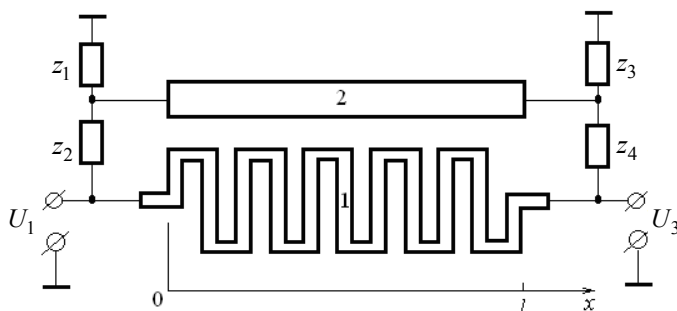


Рис. 2. Эквивалентная схема линии задержки на основе двухпроводной связанной линии

Полоска 4 в конструкции рис. 1 названа нами управляющей. В нее включаются сосредоточенные элементы (варикапы,  $p-i-n$ -диоды, транзисторы), имеющие эквивалентные сопротивления  $z_1, z_2, z_3, z_4$  (рис. 2).

Изменение  $z_1, z_2, z_3, z_4$  приводит к регулировке параметров. Особенность структуры и схемы состоит в том, что при  $z_1, z_3 \rightarrow 0, z_2, z_4 \rightarrow \infty$  время задержки максимально, а при  $z_1, z_3 \rightarrow \infty, z_2, z_4 \rightarrow 0$  – минимально, согласование же с внешними цепями сохраняется [18].

**Результаты расчета и экспериментальные данные.** Топология слоев меандровой линии задержки показана на рис. 3. Проводники расположены на разных сторонах подложки толщиной 1 мм с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r = 10$ .

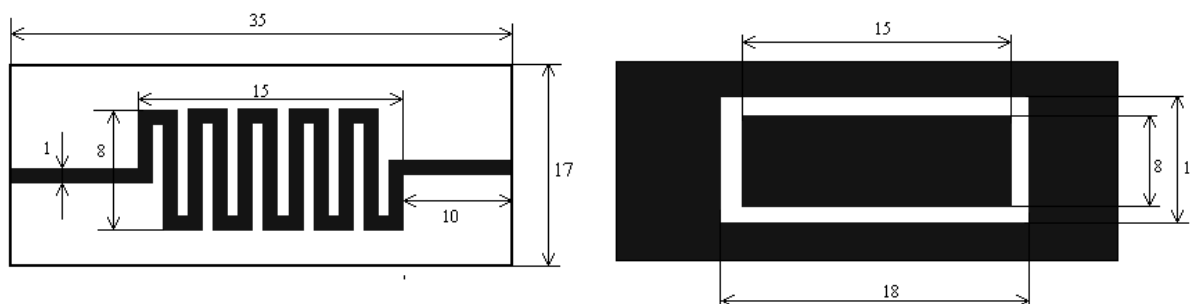


Рис. 3. Топология проводников

Расчет первичных параметров проведен по методике, опубликованной в работах [16, 17]. Матрицы погонных емкостей и индуктивностей получены следующие:

$$C = \begin{bmatrix} 6,08 & -5,602 \\ -5,602 & 8,299 \end{bmatrix} \cdot 10^{-10}, \text{ Ф/м}, \quad L = \begin{bmatrix} 27,43 & 2,899 \\ 2,899 & 7,705 \end{bmatrix} \cdot 10^{-7}, \text{ Гн/м}.$$

Матрицы погонных сопротивления и проводимостей:

$$R = \begin{bmatrix} 1,5 & 0 \\ 0 & 0,5 \end{bmatrix}, \text{ Ом/м}, \quad G = \begin{bmatrix} 10^{-4} & 0 \\ 0 & 10^{-4} \end{bmatrix}, \text{ См/м}$$

В среде Mathcad были рассчитаны частотные зависимости в диапазоне от 0 до 4 ГГц: вносимого затухания  $L_p$  управляемой меандровой линии при  $z_1, z_3 \rightarrow \infty; z_2, z_4 \rightarrow 0$ , когда время задержки минимально (рис. 4, а, сплошная линия), а при  $z_1, z_3 \rightarrow 0; z_2, z_4 \rightarrow \infty$  – максимально (рис. 4, б, сплошная линия); фазового сдвига  $\phi$ , соответствующего вышеприведенным режимам (рис. 5, а, б, сплошные линии).

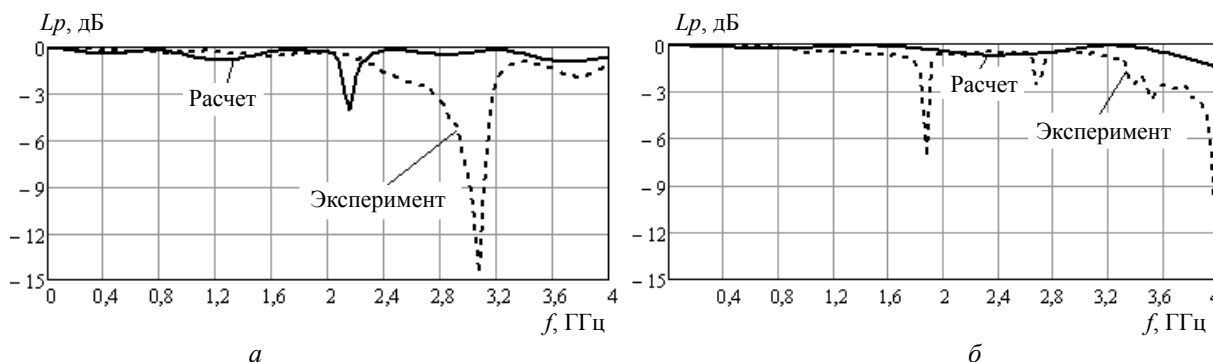


Рис. 4. Зависимость коэффициента затухания  $L_p$  управляемой линии задержки в диапазоне от 0 до 4 ГГц, расчет и эксперимент: а – при  $z_1, z_3 \rightarrow 0, z_2, z_4 \rightarrow \infty$  – время задержки максимально; б –  $z_1, z_3 \rightarrow \infty, z_2, z_4 \rightarrow 0$  – минимально

Был изготовлен макет управляемой линии задержки и измерены частотные зависимости  $L_p$  и  $\phi$  при минимальной и максимальной задержке (рис. 4–6). Измерения проводились на векторном анализаторе цепей OBZOR-804/1. Измерения показали, что до частоты 1,9 ГГц линия задержки вносит

достаточно малое затухание. Отличие экспериментальных характеристик от расчетных объясняется тем, что в расчетах не было учтено влияние собственного резонанса управляющей полоски в области УВЧ (см. рис. 4, 5) в обоих режимах работы. Моделирование с учетом электродинамических процессов подтвердило это предположение.

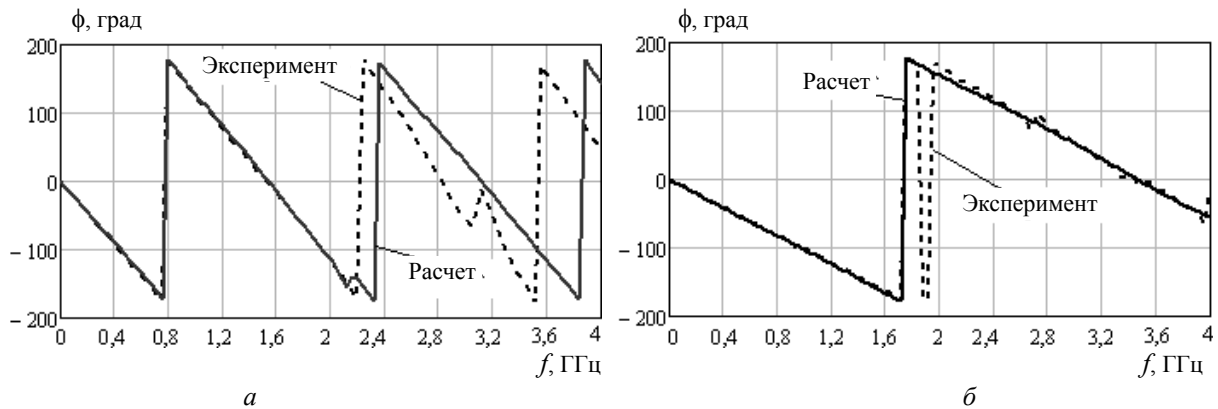


Рис. 5. Зависимость фазового сдвига  $\phi$  управляемой линии задержки в диапазоне до 4 ГГц, расчет и эксперимент: *а* – при  $z_1, z_3 \rightarrow \infty, z_2, z_4 \rightarrow 0$ ; *б* –  $z_1, z_3 \rightarrow 0, z_2, z_4 \rightarrow \infty$

При помощи осциллографа DSA-8300 были сняты переходные характеристики управляемой линии задержки (рис. 6), где  $U_1$  – сигнал на входе меандровой линии задержки, а  $U_2$  – на выходе: *а*) при максимальной задержке; *б*) при минимальной задержке сигнала. Из осциллограмм рис. 6 видно, что величина управляемой задержки составила  $195 \pm 2$  пс. Важно, что при этом не происходит существенного искажения воздействующего импульса, поскольку в диапазоне 0...1,8 ГГц вносимое затухание невелико, а фазочастотная характеристика остается линейной. Это свидетельствует о приблизительном равенстве характеристических сопротивлений полосковой структуры при управлении параметрами как при воздействии гармонического сигнала (см. рис. 4, 5), так и при импульсном воздействии (см. рис. 6).

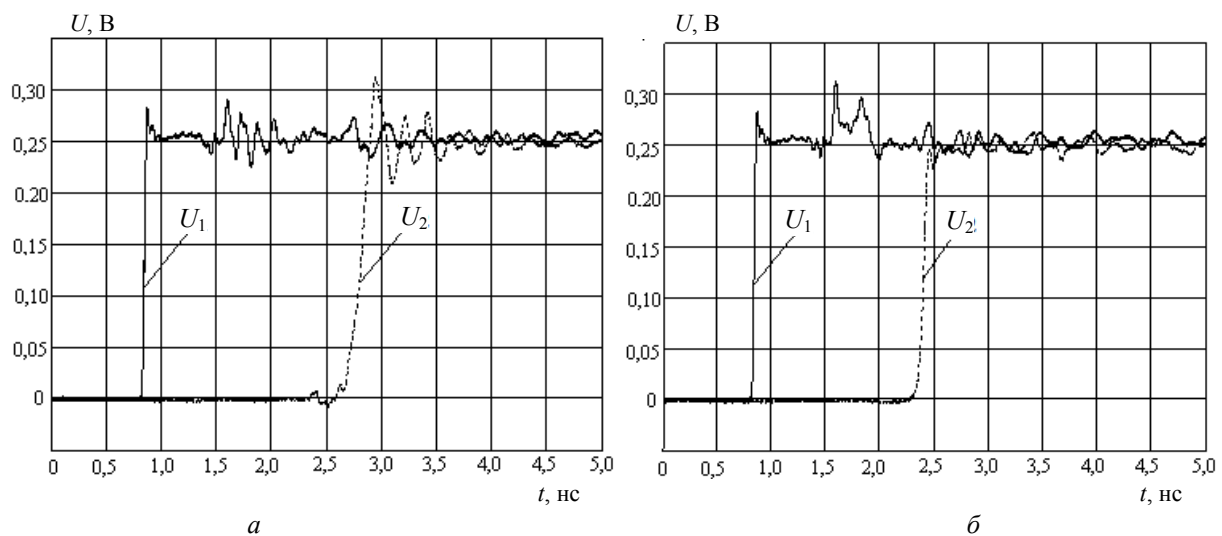


Рис. 6. Переходная характеристика управляемой линии задержки:  $U_1$  – на входе меандра,  $U_2$  – на выходе меандровой линии задержки: *а* – при  $z_1, z_3 \rightarrow \infty; z_2, z_4 \rightarrow 0$  (время задержки максимально); *б* – при  $z_1, z_3 \rightarrow 0; z_2, z_4 \rightarrow \infty$  (время задержки минимально)

**Заключение.** Таким образом, результаты исследования показали, что компактные управляемые меандровые линии задержки, построенные на основе отрезков связанных линий с сильно неуравновешенной электромагнитной связью, имеют, по крайней мере, два состояния с одинаковым характеристическим сопротивлением, что позволяет управлять задержкой импульсных сигналов, сохраняя согласование с внешними цепями и обеспечивая низкий уровень потерь.

*Литература*

1. Pregla R. Die Mäanderleitung als Laufzeitausgleichsschaltung // AEÜ. – 1967. – № 23. – P. 219–227.
2. Pregla R. Gruppenlaufzeitausgleich mit Mäanderleitungen für Nachrichtensysteme mit Rundhohlleitern // AEÜ. – 1970. – № 9. – P. 381–388.
3. Malyutin N.D. Calculation of cross-sectional dimensions of meander delay lines / N.D. Malyutin, P.A. Vorob'ev // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Radioelektronika. – 1976. – № 2 (19). – P. 103–105.
4. Wu R.B. Laddering wave in serpentine delay line / Ruey-Beei Wu., Fang-Lin Chao // IEEE Components, Packaging, and Manufacturing Technology. – 1995. – № 4 (18). – P. 644–650.
5. The effect of loss-tangent on laddering behavior in delay lines / A. Kabiri, M. Bait-Suwailam, M.H. Kermani, O.M. Ramahi // Progress In Electromagnetics Research Letters. – 2009. – Vol. 12. – P. 161–170 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.jpier.org/pierl/pier.php?paper=09102503>, свободный (дата обращения: 16.11.2015).
6. Fang-Lin Chao. Measurement of Laddering Wave in Lossy Serpentine Delay Line // International Journal of Applied Science and Engineering. – 2006. – № 3 (4). – P. 291–295.
7. A Delay line circuit design for crosstalk minimization using genetic algorithm / Chaeho Chung, Soobum Lee, Byung Man Kwak, Gawon Kim, Joungho Kim // IEEE Transactions on computer-aided design of integrated circuits and systems. – 2008. – № 3 (27). – P. 578–583.
8. Rubin B.J. Study of meander line delay in circuit boards / B.J. Rubin, B. Singh // IEEE Trans. on microwave theory and techn. – 2000. – № 9 (48). – P. 1452–1460.
9. Kabiri A. Design of a controllable delay line / A. Kabiri, Q. He, M.H. Kermani, O.M. Ramahi // IEEE Trans. on advanced packaging. – 2010. – № 4 (33). – P. 1080–1087.
10. Ramahi O.M. Analysis of Conventional and novel delay lines: a numerical study // Applied Computational Electromagnetics Society Journal. – 2003. – № 3. – P. 181–190.
11. Распространение импульса в меандровой линии с неоднородным диэлектрическим заполнением без искажений его формы перекрестными наводками / Р.С. Суровцев, А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов, П.Е. Орлов // Доклады ТУСУРа. – 2014. – № 4 (34). – С. 34–38.
12. Грачёв Г.Г. Исследование двух способов возбуждения меандровых линий / Г.Г. Грачёв, В.А. Калошин // Журнал радиоэлектроники. – 2001. – № 3 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/iso/mar11/5/text.html>, свободный (дата обращения: 15.11.2015).
13. Hejazi Z.M. EM full-wave analysis and testing of novel quasi-elliptic microstrip filters for ultra narrowband filter design // Progress in electromagnetics research. – 2008. – № 85. – P. 261–288.
14. Vorob'ev, P.A. Quasi-T-waves in devices using coupled strip lines with unbalanced electromagnetic coupling / P.A. Vorob'ev, N.D. Malyutin, V.N. Fedorov // Radio Engineering and Electronic Physics (English translation of Radiotekhnika i Elektronika). – 1982. – Vol. 27, is. 9. – P. 38–44.
15. Малютин Н.Д. Аналоговый фазовращатель дециметрового диапазона / Н.Д. Малютин, А.Н. Сычев // Приборы и техника эксперимента. – 1987. – № 4. – 244 с.
16. Малютин Н.Д. Многосвязные полосковые структуры и устройства на их основе / Н.Д. Малютин. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1990. – 164 с.
17. Сычев А.Н. Управляемые СВЧ-устройства на многомодовых полосковых структурах / А.Н. Сычев. – Томск: Том. гос. ун-т, 2001. – 318 с.
18. Effect of multiple changes of phase and group velocity of traveling waves in the microwave broadband devices based on strip structures with a strongly unbalanced electromagnetic coupling / N.D. Maljutin, A.G. Loschilov, A.N. Sychev, A.N. Maljutina // CriMiCo 2014 – 24-th International Crimean conference microwave and telecommunication technology: conference proceedings. – Sevastopol, Crimea, Ukraine, 2014. – P. 567–569.

---

**Малютин Николай Дмитриевич**

Д-р техн. наук, профессор, директор НИИ систем электросвязи ТУСУРа

Тел.: +7-913-854-48-48

Эл. почта: ndm@main.tusur.ru

**Лошилов Антон Геннадьевич**

Канд. техн. наук, зав. каф. конструирования узлов и деталей РЭА (КУДР) ТУСУРа

Тел.: +7-906-947-69-20

Эл. почта: yogl@mail.ru

**Тренкаль Евгений Игоревич**

Аспирант каф. КУДР

Тел.: +7-913-816-57-16

Эл. почта: trenkal@mail.ru

**Федоров Вячеслав Николаевич**

Канд. техн. наук, докторант каф. КУДР, доцент каф. радиотехники и информационных технологий

Северо-Восточного федерального университета, Якутск

Тел.: +7-914-224-89-74

Эл. почта: fvnsvfu@mail.ru

Malyutin N.D., Loschilov A.G., Trenkal E.I., Fedorov V.N.

**Meander Microstrip Controlled Delay Lines**

In the article authors present the results of the investigation of compact Meander Controlled Delay Lines. The devices are designed as coupled lines segments with strongly unbalanced electromagnetic coupling. In the parameters management, such structures have at least two states with the same characteristic impedance, that allows to control the delay of pulse signals, while maintaining the matching with external circuits and providing a low level of losses.

**Keywords:** coupled strip lines, meander lines, delay time control, unbalanced electromagnetic coupling.

---