

УДК 537.87

Equivalent Circuit and Mathematical Models of the Geometrical Heterogeneity Surface Accounting of a Microwave Multilayered Integrated Circuits Based-on the Technology of Low-Temperature Cofired Ceramics

Igor D. Zyrin^{*a} and Vadim M. Karaban^b

*^a«Information Satellite Systems» Academician M.F. Reshetnev
52 Lenina Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russia*

*^bTomsk State University
of Control Systems and Radioelectronics
40 Lenin Str., Tomsk, 634050, Russia*

Received 22.09.2015, received in revised form 03.12.2016, accepted 21.02.2016

The equivalent RLCG-circuit and mathematical models of the geometrical heterogeneity a transmission line surface accounting of microwave multilayered integrated circuits based-on the technology of low-temperature cofired ceramics are presented, at circuitry and topological design of new radio-electronic devices and systems in the expanded frequency range of waves lengths.

Keywords: technology of the low-temperature cofired ceramics, multilayered integrated circuits, transmission line, microwave frequency, geometrical heterogeneity of a surface, equivalent circuit model, mathematical model.

Citation: Zyrin I.D., Karaban V.M. Equivalent circuit and mathematical models of the geometrical heterogeneity surface accounting of a microwave multilayered integrated circuits based-on the technology of low-temperature cofired ceramics, J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol., 2016, 9(2), 237-245, DOI: 10.17516/1999-494X-2016-9-2-237-245.

© Siberian Federal University. All rights reserved

* Corresponding author E-mail address: igorpnk@mail.ru

Эквивалентная схемная и математическая модели учёта геометрической неоднородности поверхности СВЧ многослойных интегральных схем на основе технологии низкотемпературной совместно-обжигаемой керамики

И.Д. Зырин^а, В.М. Карaban^б

^а«Информационные спутниковые системы»
имени академика М.Ф. Решетнёва

Россия, 662972, Красноярский край, Железногорск, ул. Ленина, 52

^бТомский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

Россия, 634050, Томск, пр. Ленина, 40

Представлены эквивалентная RLCG-схемная и математическая модели учёта геометрической неоднородности поверхности линий передач сверхвысокочастотных многослойных интегральных схем на основе технологии низкотемпературной совместно-обжигаемой керамики при схемотехническом и топологическом проектировании новых радиоэлектронных устройств и систем в расширенном частотном диапазоне длин волн.

Ключевые слова: технология низкотемпературной совместно-обжигаемой керамики, многослойные интегральные схемы, линия передачи, сверхвысокая частота, геометрическая неоднородность поверхности, эквивалентная схемная модель, математическая модель.

Распространённый метод учёта геометрической неоднородности поверхности линий передач на ранних этапах создания радиоэлектронных устройств и систем различного назначения [1, 2] заключается в использовании математических моделей поправочного коэффициента (модели Хурая, Хэммерстада, Холла) в виде функции, описывающей форму скин-слоя [3]. Однако подобные модели зачастую разработаны под конкретную технологию изготовления (печатные платы на основе стеклотекстолита либо ламинатов) и не всегда адекватно отражают реальную форму неоднородности поверхности при её смене, вследствие чего имеют большую погрешность расчёта.

Вычисление электрических характеристик линий передач с учётом потерь мощности в общем случае требует корректировки импеданса [3]:

$$Z_{rough} = Z_{smooth} \left(\frac{P_{rough}}{P_{smooth}} \right) = Z_{smooth} \cdot K, \quad (1)$$

где K – поправочный коэффициент учёта геометрической неоднородности поверхности.

Проведённые авторами экспериментальные исследования неоднородности поверхности отечественных образцов сверхвысокочастотных (СВЧ) многослойных интегральных схем (МИС) на основе низкотемпературной совместно-обжигаемой керамики (НТК) методом сканирующей электронной микроскопии показали наличие неоднородности, отличной от не-

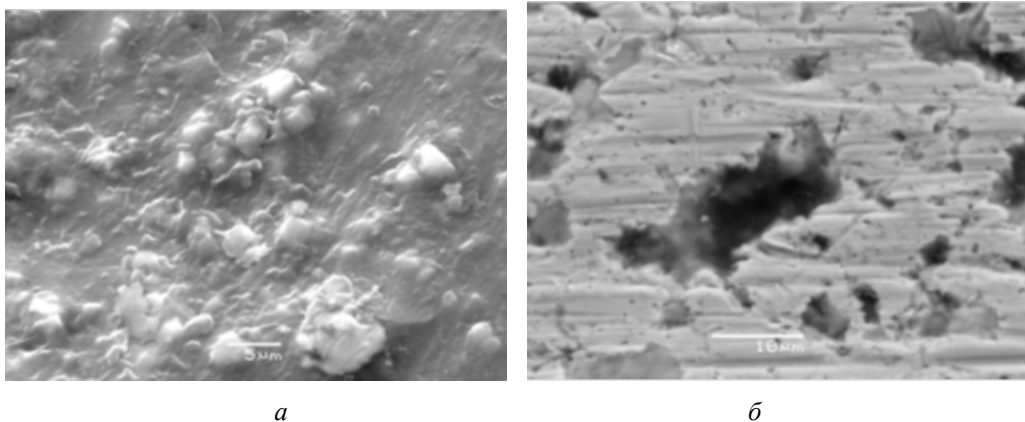


Рис. 1. Микрофотографии поверхности керамики DuPont Green Tape 951 (увеличение в 2700 раз) (а) и поверхности проводника из серебряной пасты 6148 Ag (увеличение в 2300 раз) (б)

однородности поверхности печатных плат, рассмотренных ранее (рис. 1) [3, 4]. Полученные результаты дают возможность утверждать, что имеющиеся математические модели не позволяют описать неоднородность поверхности СВЧ МИС НТК и требуется разработка адекватной математической модели и численного метода.

Эквивалентная схемная модель

Самым распространенным элементом СВЧ МИС является микрополосковая линия передачи. Для эквивалентного представления такой линии передачи используют её схемную *RLCG*-модель (рис. 2) [5].

Однако в таком виде модель линии отражает только характеристики электрически коротких линий передачи, поскольку в ней невозможны процессы отражения и протекания электрического сигнала. Также в данной модели не учитывается сопротивление и индуктивность опорной линии, которые тоже влияют на характеристики линии передачи.

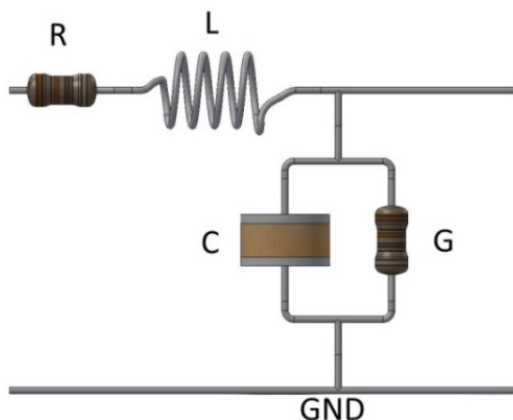
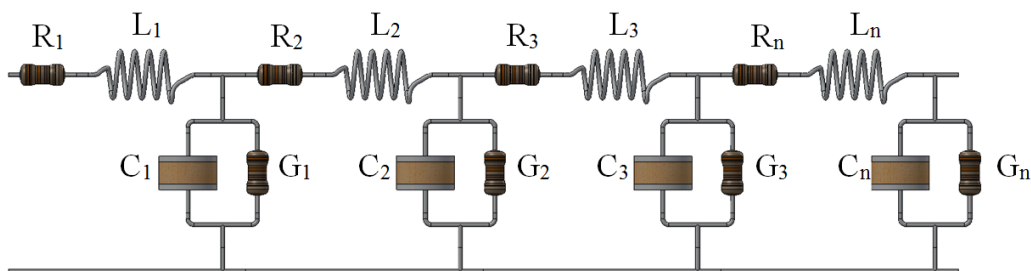
Данная модель работоспособна, если линия передачи по отношению к длине волны сигнала электрически короткая. Электрически короткими линиями в случае передачи синусоидального сигнала считаются линии, если её физическая длина l много меньше четверти минимальной длины электромагнитной волны λ_{min} разрабатываемого устройства. λ_{min} для линии передачи можно рассчитать следующим образом:

$$\lambda_{min} = v/f_{max}, \quad (2)$$

где v – скорость распространения электромагнитной волны в линии передачи, м/с; f_{max} – максимальная частота разрабатываемого устройства, Гц.

Электрически короткими линиями для цифровых схем, в которых передача сигнала выполняется прямоугольными импульсами, считается линия передачи, физическая длина которой много меньше длины переднего фронта сигнала.

Для учёта электрически длинных линий передачи используется метод деления длинной линии передачи на более короткие звенья (рис. 3).

Рис. 2. $RLCG$ -модель электрически короткой линии передачиРис. 3. Типовая схемная $RLCG$ -модель электрически длинной линии передачи

И теперь, если учесть недостаток обычной $RLCG$ -модели и подставить в неё индуктивность и сопротивление опорной цепи, получим эквивалентную модель электрически длинной линии передачи (рис. 4).

Построим эквивалентную схемную модель одного звена $RLCG$ -модели линии передачи, позволяющей соединять $RLCG$ -цепочки между собой, а также учитывающую RL -характеристики опорного слоя (REF). Для дальнейшего различия обычной и модифицированной эквивалентной схемной модели линии передачи введено обозначение четырёхсторонней $RLCG$ -модели (рис. 5).

Полученная эквивалентная схемная $RLCG$ -модель микрополосковой линии передачи (рис. 5) позволяет моделировать неоднородность поверхности любой формы, поскольку появляется возможность имитировать линию передачи любым количеством цепей и звеньев. В местах, где на пути цепочки встречается паз размером меньше, чем звено цепи, вместо разрыва в цепочки будем рассчитывать $RLCG$ -характеристики звена с использованием коэффициентов коррекции согласно разработанной математической модели (21) – (24).

Согласно предлагаемому методу линия передачи имитируется последовательностью схемных $RLCG$ -компонентов со связями между линиями в виде RL -последовательности. Линия обладает индуктивностью (L), активным сопротивлением (R), межпроводной ёмкостью (C) и проводимостью утечки через изоляцию (G).

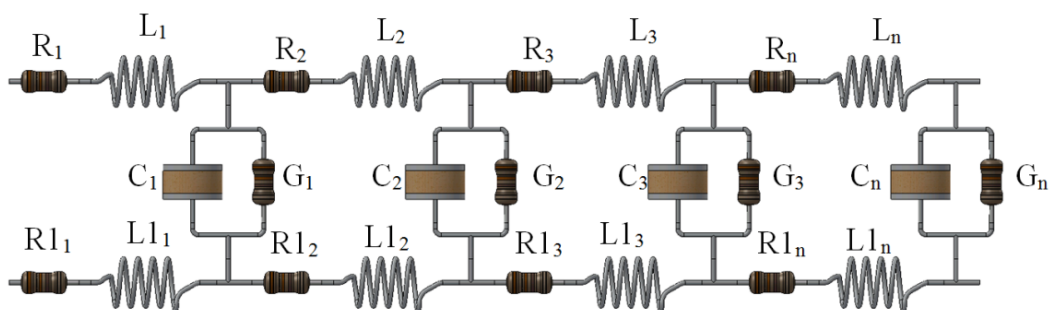


Рис. 4. Улучшенная схемная RLCG-модель электрически длинной линии передачи

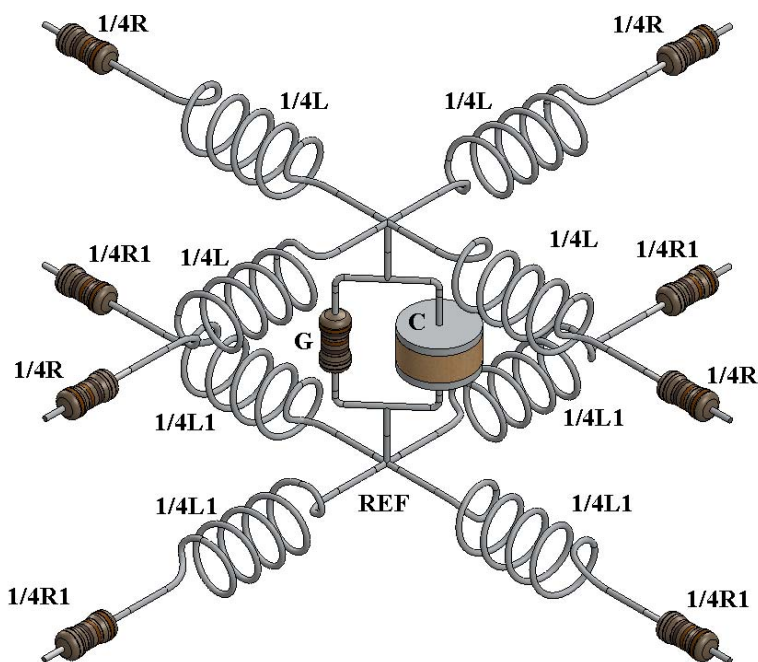


Рис. 5. Четырёхсторонняя схемная RLCG-модель микрополосковой линии передачи

Данный метод имитации линии передачи является универсальным и легко интегрируется в различные расчётные системы схемотехнического моделирования [6, 7]. Так же будет действовать правило: чем больше цепей и звеньев, тем точнее имитация неоднородности поверхности.

В качестве примера на рис. 6 представлена схемная модель микрополосковой линии передачи, в центре поверхности которой находится паз.

Математическая модель

При разработке математической модели линии передачи СВЧ МИС НТК необходимо учитывать, что в связи с поверхностным эффектом ток будет огибать поры не вертикально, как в модели Хэммерстада, а горизонтально по поверхности проводника.

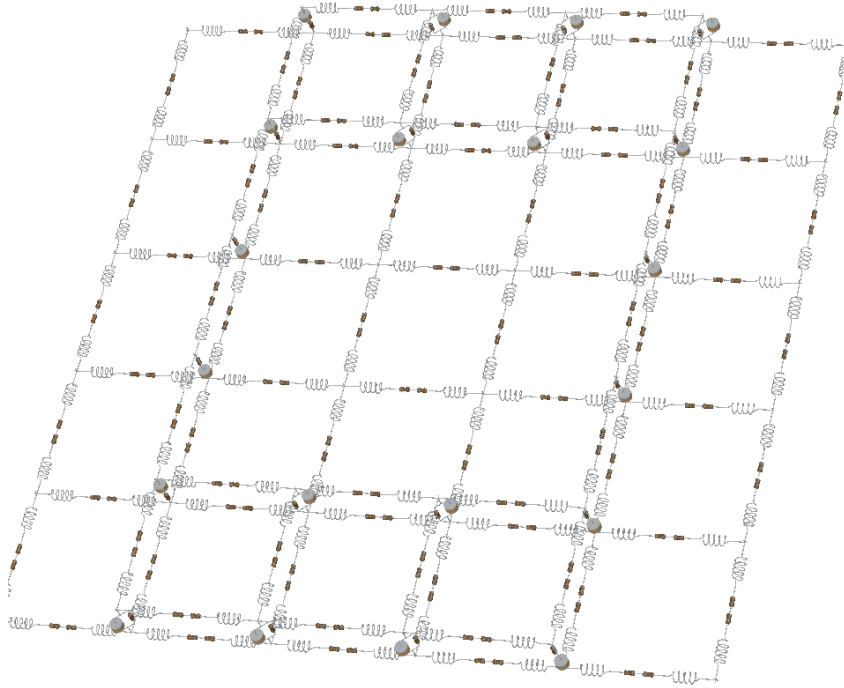


Рис. 6. Пример эквивалентной схемной $RLCG$ -модели микрополосковой линии передачи СВЧ МИС НТК с учётом геометрической неоднородности её поверхности

Полученные ранее результаты позволяют сделать вывод о том, что для имитации неоднородности поверхности СВЧ МИС НТК необходимо построить модель, учитывающую форму контуров впадин, которая может представлять собой коэффициенты корректировки длины и ширины линии передачи при вычислении значений её $RLCG$ -параметров.

Поскольку впадины снижают площадь распространения сигнала, значит, реальная ширина линии передачи должна снизиться. Вычислим коэффициент коррекции ширины:

$$K_w = 1 - \frac{P_{rough}}{w \cdot d}. \quad (3)$$

Так как на пути распространения тока возникают впадины, то ток будет огибать их и реальная длина распространения тока увеличится, коэффициент корректировки длины линии передачи будет вычисляться следующим образом:

$$K_d = 1 + \frac{P_{rough}}{w \cdot d}. \quad (4)$$

Вычислим значения $RLCG$ -параметров.

Постоянные распространения и волновое сопротивление для линии передачи можно найти по выражениям:

$$y(f) = \alpha(f) + j \cdot \beta(f), \quad (5)$$

$$Z_c = \frac{\eta_0}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\varepsilon_{eff}}} \ln \left[\frac{h \cdot a(w/h)}{w} + \sqrt{1 + \frac{4 \cdot h^2}{w^2}} \right], \quad (6)$$

где

$$a(w/h) = 6 + (2 \cdot \pi - 6) \cdot \exp \left[- \left(\frac{30,666 \cdot h}{w} \right)^{0,7528} \right], \quad (7)$$

η_0 – импеданс воздуха; ε_{eff} – эффективная диэлектрическая проницаемость.

Подставив в выражения (6) и (7) значение w , умноженное на соответствующий ей коэффициент коррекции, получим выражение для расчёта волнового сопротивления с учётом геометрической неоднородности поверхности:

$$Z_c = \frac{\eta_0}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\varepsilon_{eff}}} \ln \left[\frac{h \cdot a(w/h)}{w \cdot K_w} + \sqrt{1 + \frac{4 \cdot (h)^2}{(w \cdot K_w)^2}} \right], \quad (8)$$

где

$$a(w/h) = 6 + (2 \cdot \pi - 6) \cdot \exp \left[- \left(\frac{30,66 \cdot h}{w \cdot K_w} \right)^{0,7528} \right]. \quad (9)$$

Согласно [8] обозначив скорость света c , найдем постоянную распространения с учётом потерь для конкретной частоты в соответствии со следующим выражением:

$$y(f) = \alpha_c(f) + \alpha_d(f) + j \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\varepsilon_r(f)}. \quad (10)$$

Потери в металлическом проводнике и диэлектрические определяются так:

$$\alpha_c(f) = 1,38 \cdot \left\{ 1 + \frac{h}{w_{eff}} \cdot \left[1 + \frac{1}{\pi} \cdot \ln \left(\frac{2h}{t} \right) \right] \right\} \cdot \frac{R_s(f)}{h \cdot Z_c(f)} \cdot \frac{32 - \left(\frac{w \cdot K_w}{h} \right)^2}{32 + \left(\frac{w \cdot K_w}{h} \right)^2}, \quad (11)$$

$$\alpha_d(f) = 27,3 \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_r - 1} \cdot \frac{\varepsilon_{eff} - 1}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \cdot \frac{\tan(\delta)}{\frac{2\pi f}{c}}, \quad (12)$$

где

$$R_s(f) = \sqrt{\pi \cdot \mu_0 \cdot \rho \cdot f}, \quad (13)$$

$$w_{eff} = \begin{cases} w \cdot K_w + \frac{1,25}{\pi} \left[1 + \ln \left(\frac{2h}{t} \right) \right], & \text{если } \frac{w \cdot K_w}{h} < \frac{1}{2\pi}, \\ w \cdot K_w + \frac{1,25}{\pi} \left[1 + \ln \left(\frac{4\pi w \cdot K_w}{t} \right) \right], & \text{если } \frac{w \cdot K_w}{h} \geq \frac{1}{2\pi}. \end{cases} \quad (14)$$

Зная уравнения Z_c и $y(f)$, можно получить значения элементов, зависящих от длины для эквивалентной $RLCG$ -схемы линии передачи. Для этого будем использовать уравнения, связывающие Z_c и y с $RLCG$ -параметрами [9].

$$y = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}, \quad (15)$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}. \quad (16)$$

Далее, решая выражения (15) и (16), выведем уравнения для определения значений элементов $RLCG$ -схемы:

$$R = \operatorname{Re}\{yZ_c\}, \quad (17)$$

$$L = \frac{\text{Im}\{yZ_c\}}{\omega}, \quad (18)$$

$$C = \text{Im}\left\{\frac{y}{Z_c}\right\} \omega, \quad (19)$$

$$G = \text{Re}\left\{\frac{y}{Z_c}\right\}, \quad (20)$$

где $\text{Re}[z]$ и $\text{Im}[z]$ – реальная и мнимая части комплексного числа z и $\omega = 2\pi f$ – угловая частота. После чего, обозначив ρ как проводимость материала, установив значение длины линии передачи d с учётом коэффициента коррекции (3) и используя выражения (8), (10), (17) – (20), можно получить выражения для расчёта значений $RLCG$ -линии передачи:

$$R = \frac{d \cdot K_d \cdot \sqrt{\pi \cdot \mu_0 \cdot \rho \cdot f}}{w \cdot K_w}, \quad (21)$$

$$L = \frac{d \cdot K_d \cdot Z_c}{c} \cdot \sqrt{\varepsilon_{eff}}, \quad (22)$$

$$C = \frac{d \cdot K_d \cdot \sqrt{\varepsilon_{eff}}}{c \cdot Z_c}, \quad (23)$$

$$G = d \cdot K_d \cdot \tan(\delta) \cdot \omega \cdot C, \quad (24)$$

где d – длина линии передачи; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; $\tan(\delta)$ – тангенс угла диэлектрических потерь.

Заключение

Таким образом, в ходе исследования разработана:

- эквивалентная схемная $RLCG$ -модель микрополосковой линии передачи СВЧ МИС НТК, позволяющая осуществлять дискретизацию её поверхности с анизотропной проводимостью и повысить скорость расчёта параметров полезного сигнала при сохранении требуемой точности, предъявляемой к схемотехническому и топологическому проектированию;
- математическая модель микрополосковой линии передачи СВЧ МИС НТК, отличающаяся от существующих тем, что посредством коэффициентов коррекции длины и ширины имеет возможность учитывать геометрическую неоднородность её поверхности и позволяет повысить точность расчёта параметров полезного сигнала.

Список литературы

- [1] Zyrin I.D., Karaban V.M. Development of microwave power divider for radio module based on low-temperature cofired ceramics. *24th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo 2014)*, 2014, p. 582-583.
- [2] Zyrin I.D., Karaban V.M. Development of microwave filters for radio modules based on low-temperature cofired ceramics. *24th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo 2014)*, 2014, p. 586-587.
- [3] Zyrin I.D., Karaban V.M., Syncov S.B. Review of capabilities of mathematical models for surface roughness of the low-temperature ceramic circuit boards. *23rd International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo 2013)*, 2013, p. 181-182.

[4] Зырин И.Д., Карабан В.М. Влияние шероховатости поверхности керамики марки Green Tape 951 и серебряной пасты 6148 фирмы Du Pont на параметры сигнала микрополосковой линии. *Молодёжь и современные информационные технологии*. Томск, 2014, 1, 246-247 [Zyryn I.D., Karaban V.M. The influence of surface roughness of ceramics brand Green Tape 951 and silver paste 6148 firm Du Pont on the signal parameters of the microstrip line. *Youth and modern information technologies*, 2014, 1, 246-247 (in Russian)]

[5] Говард Д., Мартин Г. *Высокоскоростная передача цифровых данных. Высший курс чёрной магии*. М., СПб., Киев: Вильямс, 2005, 1010 с. [Govard D., Martin G. *High-speed transmission of digital data. The higher course of black magic*. Moscow, St. Petersburg, Kiev, Viliams, 2005, 1010 p. (in Russian)]

[6] Karaban V.M., Zyryn I.D. The multilayer integrated circuit of bandpass filter design based on macromodels and equivalent circuits for RLC-elements. *24th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo 2014)*, 2014, p. 127-128.

[7] Karaban V.M., Zyryn I.D. Synthesis of equivalent circuits for embedded RLC-components based on LTCC. *24th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo 2014)*, 2014, p. 655-656.

[8] Hall S., Pytel S., Huray P., Hua D., Moonshiram A., Birst G., Sijercic E. Multigigahertz causal transmission line modeling methodology using a 3-D hemispherical surface roughness approach. *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions*, 55(12), p. 2614-2624.

[9] Xiao M.A. *Modeling of conductor surface roughness effect*. Urbana: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2014, 35 p.