

---

---

## ТЕОРІЯ І ПРАКТИКА РАДІОВИМІРЮВАНЬ

УДК 621.317.7.089

### МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КОМУТАЦІЙНО- МОДУЛЯЦІЙНОГО ПЕРЕМИКАЧА НИЗЬКОІНТЕНСИВНИХ ММ-СИГНАЛІВ

*Куценко В.П.<sup>1</sup>, к.т.н., с.н.с., Яненко О.П.<sup>2</sup>, д.т.н., професор  
Сергієнко С.П.<sup>3</sup>, к.ф.-м.н., доцент*

<sup>1</sup>*Державний університет інформатики і штучного інтелекту,  
м. Донецьк, Україна*

<sup>2</sup>*Національний технічний університет України  
"Київський політехнічний інститут", м.Київ, Україна*

<sup>3</sup>*Донецький національний університет, м. Донецьк, Україна*

#### Вступ

При вимірюванні параметрів низькоінтенсивних мм-сигналів використовуються радіометри, що представляють собою систему вузлів і блоків, призначених для прийому і перетворення радіохвиль природного або штучного походження, що поширюються в різних об'єктах. З погляду забезпечення високої чутливості і точності вимірів, розширення функціональних можливостей і гнучкості побудови структурної схеми, як показують дослідження, досить перспективними для радіометрії є використання модуляційних (з періодичним порівнянням) методів вимірювання [1].

Основний елемент, який визначає точність і надійність радіометричних засобів вимірювання періодичного порівняння, є комутаційно-модуляційний перемикач (КМП). Одним із важливих параметрів КМП є коефіцієнт передачі, що характеризує реальне послаблення комутованих сигналів через кінцеве значення опору відкритого каналу і вхідного опору іншого перетворювача, який під'єднаний до виходу перемикача. На величину похибок, що вносяться КМП, можуть впливати перехідні процеси в його плечах при впливі керуючого сигналу  $F_0(t)$  [2], розходження значень його коефіцієнтів відбиття і передачі різних каналів у стаціонарному стані, а також «паразитні» радіотеплові шуми вхідних елементів. Урахування впливу перших факторів розглянуті у літературі [3, 4].

Як показує аналіз [4-8], розрахунки параметрів КМП зазначених високочутливих радіометрів здійснюється без обліку власних шумів вхідних елементів схем, що приводить до додаткових похибок вимірювань. Крім того при розрахунках допускаються наближення симетричності пристрів і погодженості плеч, що на практиці складно здійснюється і, відповідно, ці спрощення закладають додаткові похибки при розрахунках [9, 10].

**Постановка задачі дослідження**

При розрахунках КМП, що працює в умовах вимірювання низькоінтенсивних мм-сигналів, рівень потужності яких нижче «паразитних» шумів вхідних елементів, такі спрощення не можна застосовувати. Тому метою даної роботи є розробка математичної моделі КМП низькоінтенсивних сигналів, що дозволить оптимізувати його комплексні параметри і розрахувати параметри хвиль в його плечах.

**Результати дослідження**

Розглянемо роботу КМП на прикладі двохантного супергетеродинного радіометра, вхідна частина якого представлена на рис. 1 [11]. До плеча 1 КМП підключена опорна антена X1, до плеча 2 підключена вимірювальна антена X2, а вихід КМП (плече 3) підключений до змішувача U1. Низькоінтенсивні сигнали ( $10^{-19}$ – $10^{-21}$  Вт/Гц) мм-діапазону від опорного джерела приймає антена X1, а від досліджуваного джерела антена X2.

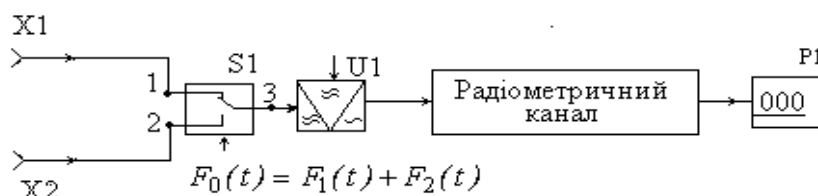


Рис. 1

Для розгляду і розрахунку комплексних параметрів КМП в умовах низькоінтенсивних сигналів представимо його як узагальнений шестиполіусник (рис. 2).

Відповідно до представленої моделі КМП (рис. 2) кожному його і-му стану відповідають і-ті значення параметрів узагальненого шестиполіусника  $S_{mn}$ . На цій схемі позначені:  $\Gamma_{X1}$ ,  $\Gamma_{X2}$ ,  $\Gamma_{ЗМ}$  – відповідно коефіцієнти комплексного відбиття (ККВ) антени X1, антени X2 і змішувача. Нормовані відбиті хвилі  $b_n^{(i)}$  у плечах шестиполіусника пов'язані з нормованими падаючими хвилями  $a_n^{(i)}$  через елементи матриці розсіювання  $[S]$  наступною системою рівнянь:

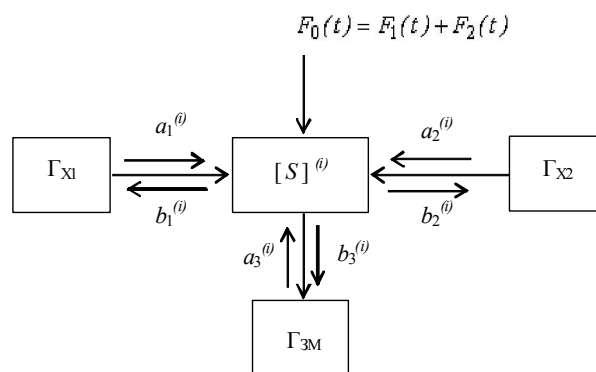


Рис. 2

Граничні умови на полюсах у цьому випадку записуються як

$$\begin{cases} b_1^{(i)} = S_{11}^{(i)} a_1^{(i)} + S_{12}^{(i)} a_2^{(i)} + S_{13}^{(i)} a_3^{(i)} \\ b_2^{(i)} = S_{21}^{(i)} a_1^{(i)} + S_{22}^{(i)} a_2^{(i)} + S_{23}^{(i)} a_3^{(i)} \\ b_3^{(i)} = S_{31}^{(i)} a_1^{(i)} + S_{32}^{(i)} a_2^{(i)} + S_{33}^{(i)} a_3^{(i)} \end{cases} \quad (1)$$

Граничні умови на полюсах у цьому випадку записуються як

$$\begin{cases} a_1^{(i)} = E_{A1} + b_1^{(i)} \Gamma_{X1} \\ a_2^{(i)} = E_{A2} + b_2^{(i)} \Gamma_{X2} , \\ a_3^{(i)} = E_{3M} + b_3^{(i)} \Gamma_{3M} \end{cases} \quad (2)$$

де  $E_{A1}=E_{X1}+E_{ШХ1}$ ,  $E_{A2}=E_{X2}+E_{ШХ2}$  – електричні компоненти сигналів, що надходять відповідно від антени X1 і антени X2 та складаються із власних радіотеплових шумів антен  $E_{ШХ1}$  і  $E_{ШХ2}$  і прийнятих електромагнітних сигналів  $E_{X1}$  і  $E_{X2}$ , а також власних радіотеплових шумів  $E_{3M}$  змішувача U1.

Після того як ми підставимо (2) в (1) одержуємо

$$\begin{cases} b_1 = S_{11}(E_{A1} + b_1^{(i)} \Gamma_{X1}) + S_{12}(E_{A2} + b_2^{(i)} \Gamma_{X2}) + S_{13}(E_{3M} + b_3^{(i)} \Gamma_{3M}) \\ b_2 = S_{21}(E_{A1} + b_1^{(i)} \Gamma_{X1}) + S_{22}(E_{A2} + b_2^{(i)} \Gamma_{X2}) + S_{23}(E_{3M} + b_3^{(i)} \Gamma_{3M}) \\ b_3 = S_{31}(E_{A1} + b_1^{(i)} \Gamma_{X1}) + S_{32}(E_{A2} + b_2^{(i)} \Gamma_{X2}) + S_{33}(E_{3M} + b_3^{(i)} \Gamma_{3M}) \end{cases} \quad (3)$$

Перетворимо систему рівнянь (3):

$$\begin{cases} -S_{11}E_{A1} = b_1(S_{11}\Gamma_{X1} - 1) + S_{12}(E_{A2} + b_2^{(i)}\Gamma_{X2}) + S_{13}(E_{3M} + b_3^{(i)}\Gamma_{3M}) \\ -S_{22}E_{A2} = S_{21}(E_{A1} + b_1^{(i)}\Gamma_{X1}) + b_2(S_{22}\Gamma_{X2} - 1) + S_{23}(E_{3M} + b_3^{(i)}\Gamma_{3M}) \\ -S_{33}E_{3M} = S_{31}(E_{A1} + b_1^{(i)}\Gamma_{X1}) + S_{32}(E_{A2} + b_2^{(i)}\Gamma_{X2}) + b_3(S_{33}\Gamma_{3M} - 1) \end{cases} \quad (4)$$

Для рішення даної системи рівнянь зробимо заміни:

$$\begin{array}{lll} S_{11}E_{A1} = X & S_{11}\Gamma_{X1} - 1 = M & S_{12}E_{A2} = F \\ S_{22}E_{A2} = Y & S_{22}\Gamma_{X2} - 1 = N & S_{21}E_{A1} = G \\ S_{33}E_{3M} = Z & S_{33}\Gamma_{3M} - 1 = E & S_{31}E_{A1} = H \\ S_{12}\Gamma_{X2} = J & S_{13}E_{3M} = T & S_{13}\Gamma_{3M} = W \\ S_{21}\Gamma_{X1} = K & S_{23}E_{3M} = U & S_{23}\Gamma_{3M} = P \\ S_{31}\Gamma_{X1} = S & S_{32}E_{A2} = V & S_{32}\Gamma_{X2} = Q \end{array} \quad (5)$$

Після підстановки (5) в (4) одержуємо:

$$\begin{cases} -X = b_1^{(i)}M + F + b_2^{(i)}J + T + b_3^{(i)}W \\ -Y = G + b_1^{(i)}K + b_2^{(i)}N + U + b_3^{(i)}P \\ -Z = H + b_1^{(i)}S + V + b_2^{(i)}Q + b_3^{(i)}E \end{cases} \quad (6)$$

З першого рівняння системи (6) визначаємо  $b_1$ :

$$b_1^{(i)} = - \left[ \frac{X + F + b_2^{(i)}J + T + b_3^{(i)}W}{M} \right] \quad (7)$$

З другого рівняння системи (6) після перетворення визначаємо  $b_2$  через  $b_3$ :

$$b_2^{(i)} = \left[ \frac{G + U + Y - \frac{K}{M}[X + F + T] - b_3^{(i)}\left(\frac{KW}{M} - P\right)}{\left(\frac{KJ}{M} - N\right)} \right] \quad (8)$$

Після перетворення одержуємо значення для нормованої відбитої хвилі  $b_3$  на виході КМП:

$$b_3^{(i)} = \frac{\left[ (X+F+T) - \left(\frac{M}{S}\right) \left[ (Z+H+V) + Q \frac{\left( (G+U+Y) - \frac{K}{M} (X+F+T) \right)}{\left( \frac{KJ}{M} - N \right)} \right] + J \frac{\left( (G+U+Y) - \frac{K}{M} (X+F+T) \right)}{\left( \frac{KJ}{M} - N \right)} \right]}{\left[ \left( \frac{M}{S} \right) \left\{ \frac{Q \left( \frac{KW}{M} - P \right)}{\left( \frac{KJ}{M} - N \right)} - E \right\} - \left\{ \frac{J \left( \frac{KW}{M} - P \right)}{\left( \frac{KJ}{M} - N \right)} - W \right\} \right]} \quad (9)$$

Для знаходження елементів  $(S_{mn})$  матриці розсіювання  $[S]$  КМП, побудованого на основі хвилевідного трійника (ХТ) з розміщеними в плечах 1 і 2 комутаційними *pin*-діодами Д1 і Д2 (рис. 3), зробимо розрахунок і аналіз за допомогою орієнтованих графів.

У КМП застосований звичайний ХТ з перегородкою між 1 і 2 плечима, *pin*-діоди Д1 і Д2 включаються в розрив ліній що йдуть до антен. Відповідно до полярності керуючих імпульсів закриваються по черзі перший або другий діод. Від закритих діодів сигнал відбивається, а відкритий діод пропускає сигнал у плече 3.

Еквівалентна схема КМП представлена на рис. 3.

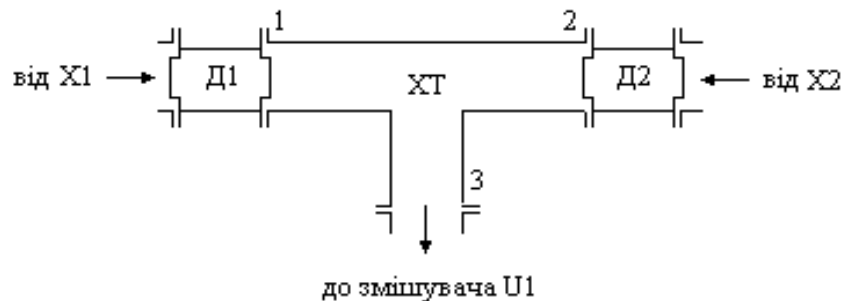


Рис. 3

Шестиполіусник (рис. 3) характеризується матрицею розсіювання  $[S_T]$  з елементами  $(S_{mn})_T$ , а підключені до плечей 1 і 2 *pin*-діоди Д1 і Д2 являють собою чотирьохполіусники з матрицями розсіювання  $[S']$  і  $[S'']$  (рис. 4).

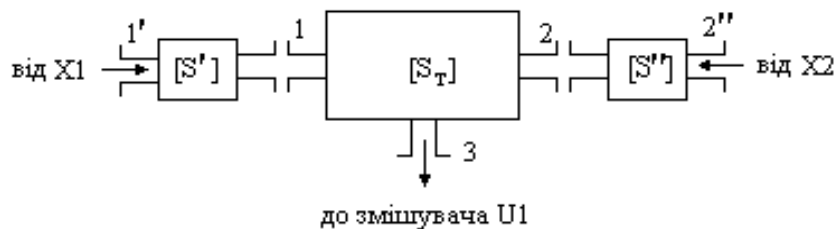


Рис. 4

На підставі узагальненої структури моделі КМП побудуємо орієнтований граф (рис. 5).

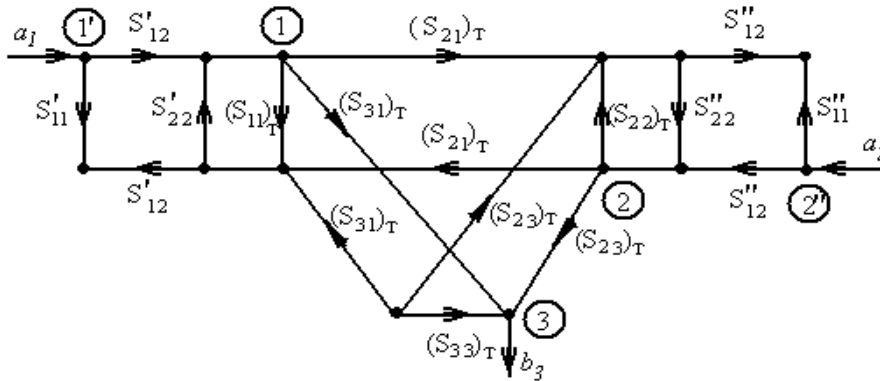


Рис. 5

Перетворення наведеного графу [4, 5] дозволяє одержати рівняння для елементів матриці [S], що визначають його властивості:

$$S_{11} = S'_{11} + \frac{(S'_{12})^2 (S_{12})_{T^2} + (S'_{12})^2 (S_{11})_T [1 - S''_{22} (S_{12})_T]}{1 - (S_{22})_T S''_{22} - (S_{11})_T S'_{22} - (S_{12})_T^2 S'_{22} S''_{22} + (S_{11})_T (S_{22})_T S'_{22} S''_{22}}, \quad (10)$$

$$S_{12} = S_{21} = \frac{S'_{12} S''_{12} (S_{12})_T}{1 - (S_{22})_T S''_{22} - (S_{11})_T S'_{22} - (S_{12})_T^2 S'_{22} S''_{22} + (S_{11})_T (S_{22})_T S'_{22} S''_{22}}, \quad (11)$$

$$S_{13} = S_{31} = \frac{S'_{12} (S_{13})_T [1 - S''_{22} (S_{22})_T] + (S_{12})_T (S_{23})_T S'_{12} S''_{22}}{1 - (S_{22})_T S''_{22} - (S_{11})_T S'_{22} - (S_{12})_T^2 S'_{22} S''_{22} + (S_{11})_T (S_{22})_T S'_{22} S''_{22}}, \quad (12)$$

$$S_{22} = S''_{11} + \frac{(S''_{12})^2 S'_{22} (S_{12})_T^2 + (S''_{12})^2 (S_{22})_T [1 - S'_{22} (S_{11})_T]}{1 - (S_{22})_T S''_{22} - (S_{11})_T S'_{22} - (S_{12})_T^2 S'_{22} S''_{22} + (S_{11})_T (S_{22})_T S'_{22} S''_{22}}, \quad (13)$$

$$S_{23} = S_{32} = \frac{S''_{12} (S_{23})_T [1 - S'_{22} (S_{11})_T] + (S_{12})_T (S_{13})_T S'_{12} S''_{22}}{1 - (S_{22})_T S''_{22} - (S_{11})_T S'_{22} - (S_{12})_T^2 S'_{22} S''_{22} + (S_{11})_T (S_{22})_T S'_{22} S''_{22}}, \quad (14)$$

$$S_{33} = (S_{33})_T + \frac{(S_{23})_T \{ S''_{22} (S_{23})_T [1 - S'_{22} (S_{11})_T] + S'_{22} S''_{22} (S_{12})_T (S_{13})_T \} + (S_{13})_T \{ S'_{22} (S_{13})_T [1 - S''_{22} (S_{22})_T] + S''_{22} S'_{22} (S_{12})_T (S_{23})_T \}}{1 - (S_{22})_T S''_{22} - (S_{11})_T S'_{22} - (S_{12})_T^2 S'_{22} S''_{22} + (S_{11})_T (S_{22})_T S'_{22} S''_{22}} \quad (15)$$

Формули (10-15) визначають параметри КМП, які можуть бути розраховані за елементами матриць ХТ і *pin* діодів Д1 і Д2, Цей розрахунок представляє собою складну операцію і може бути здійснений за допомогою програми Ansoft HFSS-9,2, довідкових або обмірюваних даних. Підстановка розрахованих значень елементів матриці КМП у формули (4-9) дозволяє отримати значення параметрів нормованих відбитих хвиль у його плечах в умовах перетворення і вимірювання низькоінтенсивних мм-сигналів.

Як бачимо, математична модель вихідного КМП (4-15) зв'язує вихідні сигнали КМП S1 із ККВ антен X1 і X2, навантаження R1 і входа змішувача

U1 з електричними компонентами шумових низькоінтенсивних сигналів. Перемикаючі властивості КМП S1 (коефіцієнти передачі плечей 1 і 2, розподілені величини активних опорів, індуктивностей і ємностей 1 і 2 переходів *pin* діодів, симетрія плечей 1 і 2 КМП і перехідні процеси при перемиканні), які визначають значення похибок вимірювання, ураховуються елементами матриці розсіювання і формулами в цілому.

Використання запропонованої математичної моделі при розрахунках КМП в умовах роботи із низькоінтенсивними мм-сигналами, рівень потужності яких нижчий ніж «паразитні» шуми вхідних елементів вимірювальних РС, дозволяє забезпечити підвищення точності і чутливості радіометрів.

Дана математична модель може бути використана при проектуванні КМП і розрахунках його узгодження роботи в умовах реальних схем, реалізації алгоритмів обробки вимірювальної інформації, а також як перші наближення для точного визначення параметрів вимірювального КМП при реалізації процедури його настроювання.

### **Висновки**

Таким чином математичне моделювання КМП в умовах вимірювання низькоінтенсивних мм-сигналів, рівень потужності яких нижчий рівня «паразитних» шумів вхідних елементів приймального тракту, дозволяє оптимізувати його комплексні параметри і розрахувати величини хвиль в плечах комутатора, що забезпечити підвищення точності і чутливості радіометрів.

Запропонована модель може бути використовувана на стадії проектування і настроювання КМП, а також при обробці результатів вимірювання параметрів низькоінтенсивних мм-сигналів.

### **Література**

1. Есепкина.Н.А., Корольков Д.В., Парийский Ю.Н. Радиотелескопы и радиометры. – М.: Наука, 1972. – 416 с.
2. Ю.О. Скрипник, М.О. Пресенко, В.О. Дубровний Проектування засобів вимірювання з періодичним порівнянням: книга 1 – Структура і похибки: Навч. посібник/ – Київ: 1997. – 163 с.
3. Скрипник Ю.А., Яненко А.Ф., Манойлов В.П., Куценко В.П., Гимпилевич Ю.Б. Микроволновая радиометрия физических и биологических объектов. – Житомир: „Вольный”, 2003. – 408 с.
4. Яненко О.П. Високочутливі модуляційні структури радіометричної апаратури НВЧ-діапазону //Дисертація на здобуття наук.ступеня д.т.н. Вінниця: ВНТУ, 2003.
5. Головка Д.Б., Скрипник Ю.О., Яненко О.П. Надвисокочастотні методи та засоби вимірювання фізичних величин. – К.: Либідь, 2003. – 328 с.
6. Скрипник Ю.А., Яненко А.Ф., Манойлов В.П., Куценко В.П., Гимпилевич Ю.Б. Микроволновая радиометрия физических и биологических объектов. – Житомир: „Вольный”, 2003. – 408 с.
7. Мищенко С. В., Малков Н. А. Проектирование радиоволновых (СВЧ) приборов неразрушающего контроля материалов. Тамбов: Изд. Тамб. гос. техн. ун-та, 2003 127 с.
8. Карлинер М.М. «Электродинамика СВЧ» – Новосибирск.: Изд-во Новосиб. гос.

ун-та, 2006. – 258 с.

9. М.А. Силаев, С.Ф. Брянцев Приложение матриц и графов к анализу СВЧ устройств. М.: Изд. Сов. Радио, 1970, 248 с.

10. Дж. Л. Альтман Устройства сверхвысоких частот. перевод с англ. под ред. проф. Н.В. Лебедева. М.: Изд. Мир. 1968, 482 с.

11. Куценко В.П. Радиометрична система з компенсацією шумів вимірювальної антени // Вісник Донецького національного університету. – Серія А „Природничі науки”. – Вип. 1/2009. – Донецький національний університет, 2009. – С.257-262.

*Куценко В.П., Яненко О.П., Сергієнко С.П. Математична модель комутаційно-модуляційного перемикача низькоінтенсивних мм-сигналів. Запропоновано математична модель вхідного комутаційно-модуляційного перемикача, від параметрів якого залежить точність і надійність радіометричних засобів вимірювання сигналів з періодичним порівнянням. Моделювання проводиться в умовах виміру низькоінтенсивних сигналів міліметрового діапазону, порівнянних з «паразитними» шумами вхідних елементів прийомного тракту. Отримані вираження дозволяють оптимізувати комплексні параметри і розрахувати величини хвиль у плечах комутатора, що забезпечить підвищення точності і чутливості радіометрів. Розглянутий механізм моделювання може використовуватися на стадії проектування і настроювання перемикачів, а також при обробці обмірюваної інформації.*

**Ключові слова:** радіометрія, комутація, перемикач, електромагнітне випромінювання, вимірювання, шуми.

*Куценко В.П., Яненко А.Ф., Сергиенко С.П. Математическая модель коммутационно-модуляционного переключателя низкоинтенсивных мм-сигналов Предложена математическая модель входного коммутационно-модуляционного переключателя, от параметров которого зависит точность и надежность радиометрических средств измерения сигналов с периодическим сравнением. Моделирование проводится в условиях измерения низкоинтенсивных сигналов миллиметрового диапазона, соизмеримых с «паразитными» шумами входных элементов приемного тракта. Полученные выражения позволяют оптимизировать комплексные параметры и рассчитать величины волн в плечах коммутатора, что обеспечит повышение точности и чувствительности радиометров. Рассмотренный механизм моделирования может использоваться на стадии проектирования и настройки переключателей, а также при обработке измеренной информации.*

**Ключевые слова:** радиометрия, коммутация, переключатель, электромагнитное излучение, измерение, шумы.

*Kucenko V.P., Yanenko A.F., Sergienko S.P. A mathematical model of switching-modulation switch low-intensity mm-signals. A mathematical model of input switching-modular switch, the parameters of which depends on the accuracy and reliability of radiometric measuring signals with periodic comparison. Modelling is carried out in terms of measurement low-intensity signals millimeter range, commensurate with the "parasitic" noise input elements of receiving path. Expressions obtained allow to optimize complex parameters and to calculate values of waves in the shoulders of the switch, which will enhance the accuracy and sensitivity of the radiometers. The proposed mechanism of simulation can be used at the design stage and switch settings, as well as for processing of measured information.*

**Keywords:** radiometry, switching, switch, electromagnetic radiation, measuring, noise.