

УДК 621.317.07.089

И.И. ХАВАЛИЦ, В.П. КУЦЕНКО

*Государственный университет информатики и искусственного интеллекта,
Донецк, Украина*

МИНИМИЗАЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ МИКРОВОЛНОВОЙ АППАРАТУРЫ РЕГУЛЯТОРНОГО ДЕЙСТВИЯ

Для минимизации погрешностей микроволновой аппаратуры регуляторного действия разработана математическая модель направленного волноводного ответвителя. Особенностью проведенного моделирования ответвителя является рассмотрение его работы во входных цепях данного радиометрического устройства, построенного по радарному принципу, в условиях низкоинтенсивных сигналов, уровень мощности которых соизмерим с «паразитными» шумами входных элементов. Моделирование проведено с использованием матрицы рассеяния, определены выражения для отраженных нормированных волн и для обобщенных комплексных констант, характеризующих в целом направленный ответвитель как параметрический восьмиполусник в i -м стационарном состоянии. Полученные результаты позволят в процессе расчётов и дальнейшей настройки микроволновой аппаратуры регуляторного действия получить близкие к оптимальным характеристики входных микроволновых узлов.

Ключевые слова: электромагнитное излучение, биообъект, микроволновая аппаратура регуляторного действия, направленный волноводный ответвитель, матрица рассеяния, падающие и отраженные волны, низкоинтенсивные сигналы.

Введение

На сегодняшний день во многих странах активно ведутся работы, связанные с разработкой и применением микроволновой аппаратуры регуляторного действия для исследования реакции человеческого организма (биообъекта) на воздействие электромагнитного излучения (ЭМИ). В основу действия данной аппаратуры закладывается измерение как параметров собственного радиотеплового ЭМИ миллиметрового (мм) диапазона биообъекта [1, 2], так и отраженных от его тканей сигналов, излучаемых терапевтической аппаратурой [3]. Появилось даже новое направление в этой области - изучение природы электромагнитных свойств биообъектов путем измерения и исследования мощности их ЭМИ мм-диапазона [4].

Установлено, что положительные терапевтические эффекты наблюдаются при малых интенсивностях ЭМИ, спектральная плотность которых в КВЧ диапазоне составляет $10^{-20} \dots 10^{-21}$ Вт/Гц см² [5, 6]. При этом эффективность воздействия ЭМИ на биологические объекты зависит также от характера самого излучения.

Микроволновая аппаратура регуляторного действия строится по принципу радарной системы [7]. Применение излучаемых сигналов низкой интенсивности требует использования в данной аппаратуре высокочувствительного радиометрического канала. Разработка такого рода аппаратуры мм-диапа-

зона связана с жесткими требованиями к параметрам входных микроволновых узлов, от которых в значительной степени зависит качество ее работы. Отклонение параметров входных узлов микроволновой аппаратуры от расчетных приводит в условиях низкоинтенсивных сигналов к ухудшению ее основных метрологических характеристик: точности, чувствительности, широкополосности и т.д.

Постановка задачи исследования

Таким образом, создание микроволновой аппаратуры регуляторного действия, которая обеспечивала бы высокую точность исследований реакции биологических объектов на энергетическое мм-воздействие является актуальной задачей [8, 9]. Разработка математической модели направленного волноводного ответвителя, используемого во входных цепях данной аппаратуры, позволит с минимальными погрешностями обеспечить преобразование принятых от объектов низкоинтенсивных сигналов, уровень мощности которых соизмерим с паразитными шумами входных элементов измерительной радиометрической системы.

Основная часть

Реализация микроволновой аппаратуры регуляторного действия для исследования реакции биообъекта «О» на воздействие электромагнитного из-

лучения (рис. 1) предполагает наличие генерирующего блока, подающего сигнал на приемопередающую антенну X1 через последовательно соединенные амплитудный модулятор U1, управляемый импульсным генератором G1, и направленный волноводный ответвитель (НВО) A1 [10, 11]. Принятый сигнал поступает через ответвитель A1 на смеситель U2 с гетеродином G2 и далее в радиометрический канал. К развязанному плечу ответвителя A1 подключено сопротивление нагрузки R1.

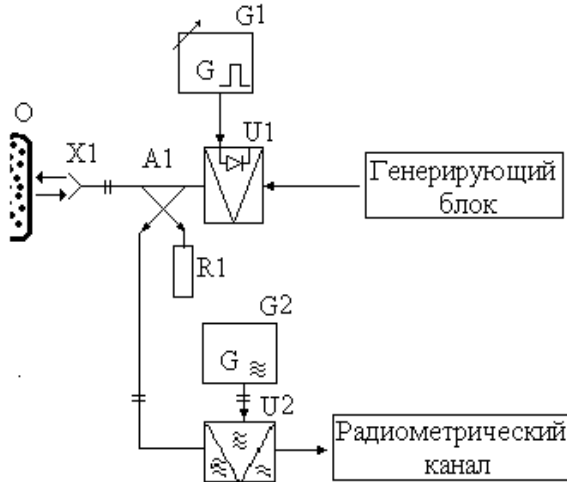


Рис. 1. Функциональная схема входного каскада микроволновой аппаратуры регуляторного действия

С целью минимизации погрешностей микроволновой аппаратуры регуляторного действия произведем разработку математической модели НВО, используемого во входных цепях данной аппаратуры и преобразующего низкоинтенсивные сигналы, уровень мощности которых соизмерим с «паразитными» шумами входных элементов системы. Математическое моделирование произведем с помощью матрицы рассеяния.

При дальнейшем рассмотрении примем следующие допущения: во входном тракте обеспечен широкополосный режим работы; процессы в тракте характеризуются квазистационарностью; амплитудный модулятор линейный; зависимость между выходными сигналами НВО и поступающими на его входа излучениями линейна; диэлектрическим заполнением НВО является воздух и он изготовлен из проводника близкого к идеальному.

НВО представим в виде восьмиполюсника, который рассмотрим как параметрическое устройство. Это связано с тем, что при воздействии управляющего сигнала $f(t)$, поступающего от импульсного генератора G1 на КВЧ модулятор, следует учитывать факторы возникновения переходных процессов, при которых параметры модулятора непрерывно изменяются во времени от одного стационарного состояния до другого. При переключении модулято-

ра осуществляется дискретное изменение параметров обобщенного восьмиполюсника во времени. Для упрощения записи i -му состоянию модулятора поставим в соответствие i -ые значения параметров обобщенного восьмиполюсника $S^{(i)}$. С учетом приведенных соображений на рис. 2 изображена структурная схема КВЧ части микроволновой аппаратуры регуляторного действия в i -м стационарном состоянии.

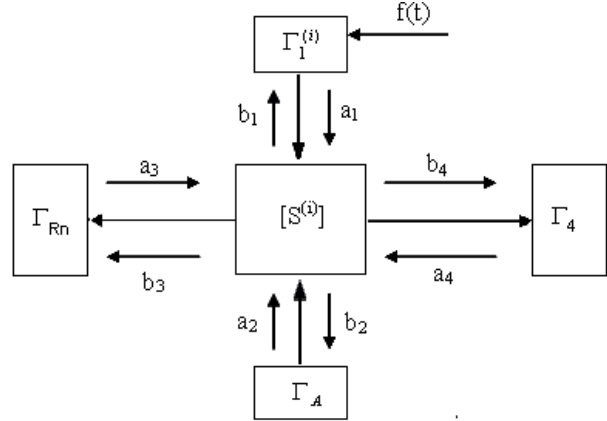


Рис. 2. КВЧ часть микроволновой аппаратуры регуляторного действия в i -м стационарном состоянии: $\Gamma_1^{(i)}$ – коэффициент отражения модулятора U1; Γ_{Rn} – коэффициент отражения с нагрузки R1; Γ_4 – коэффициент отражения КВЧ-смесителя U2; Γ_A – коэффициент отражения антенны X1.

Определим зависимость выходных сигналов КВЧ преобразователя – НВО, как восьмиполюсника, от параметров: $S_{mn}^{(i)}$, $\tilde{A}_A$, $\tilde{A}_{R1}$, $\tilde{A}_1$, $\tilde{A}_4$ и электрических компонентов шумовых полезных и паразитных сигналов: $E_1^{(i)}$, E_A , E_{Rn} и E_4 , поступающих на все плечи ответвителя, используя матрицу рассеяния [12, 13].

Для этого воспользуемся известной взаимосвязью падающих и отраженных волн на полюсах восьмиполюсника:

$$\begin{cases} b_1^{(i)} = S_{11}^{(i)} a_1^{(i)} + S_{12}^{(i)} a_2^{(i)} + S_{13}^{(i)} a_3^{(i)} + S_{14}^{(i)} a_4^{(i)}, \\ b_2^{(i)} = S_{21}^{(i)} a_1^{(i)} + S_{22}^{(i)} a_2^{(i)} + S_{23}^{(i)} a_3^{(i)} + S_{24}^{(i)} a_4^{(i)}, \\ b_3^{(i)} = S_{31}^{(i)} a_1^{(i)} + S_{32}^{(i)} a_2^{(i)} + S_{33}^{(i)} a_3^{(i)} + S_{34}^{(i)} a_4^{(i)}, \\ b_4^{(i)} = S_{41}^{(i)} a_1^{(i)} + S_{42}^{(i)} a_2^{(i)} + S_{43}^{(i)} a_3^{(i)} + S_{44}^{(i)} a_4^{(i)}. \end{cases} \quad (1)$$

где $a_1^{(i)}$, $a_2^{(i)}$, $a_3^{(i)}$, $a_4^{(i)}$ – нормированные падающие волны в плечах 1, 2, 3 и 4 НВО,

$b_1^{(i)}$, $b_2^{(i)}$, $b_3^{(i)}$, $b_4^{(i)}$ – нормированные отраженные волны соответственно в тех же плечах НВО.

Граничные условия на полюсах обобщенного восьмиполюсника в i -ом стационарном состоянии в данном случае записываются следующим образом:

$$\begin{cases} a_1^{(i)} = E_1^{(i)} + b_1^{(i)} \tilde{A}_1^{(i)}, \\ a_2^{(i)} = E_A + b_2^{(i)} \tilde{A}_A, \\ a_3^{(i)} = \tilde{A}_{Rn} + b_3^{(i)} \tilde{A}_{Rn}, \\ a_4^{(i)} = \tilde{A}_4 + b_4^{(i)} \Gamma_4, \end{cases} \quad (2)$$

где E_A и E_{Rn} – соответственно электрические компоненты сигналов от приемно-передающей антенны X1 и от нагрузки R1;

$E_1^{(i)}$, состоящая из суммы сигналов E_1^1 и E_1^M – соответственно электрических компонентов сигналов от генерирующего блока, прошедших через амплитудный модулятор U1 и радиотепловых шумов модулятора при его открытом состоянии и E_1^2 , E_1^M – соответственно электрических компонентов сигналов, поступающих из плеча 2 от антенны X1 и радиотепловых шумов модулятора U1 при его закрытом состоянии;

E_4 – электрическая компонента сигналов радиотепловых шумов смесителя U2 приемного тракта радиометра.

Решение системы уравнений (1) относительно нормированной отраженной волны b_4 , выраженной через волны b_1 , b_2 , b_3 , после преобразований имеет следующий вид:

$$b_4 = \frac{-N \times C \times A(S_{11}\tilde{A}_1 - 1) - F(S_{11}\tilde{A}_1 - 1)}{W}, \quad (3)$$

где A , C , F , N , W – обобщенные комплексные константы, характеризующие в целом параметрический восьмиполусник в i -ом стационарном состоянии.

Эти константы определяются следующими формулами:

$$A = (S_{22}S_{11}\tilde{A}_A\tilde{A}_1 - S_{21}S_{12}\tilde{A}_A\tilde{A}_1 - S_{22}\tilde{A}_A - S_{11}\tilde{A}_1 + 1), \quad (4)$$

$$\begin{aligned} C = & S_{21}S_{13}S_{12}S_{31}\tilde{A}_1^2\tilde{A}_{Rn}\tilde{A}_A - S_{12}S_{23}S_{11}S_{31}\tilde{A}_1^2\tilde{A}_{Rn}\tilde{A}_A + \\ & + S_{12}S_{23}S_{31}\tilde{A}_A\tilde{A}_{Rn}\tilde{A}_1 - S_{13}S_{31}\tilde{A}_A\tilde{A}_{Rn}A + \\ & + S_{21}S_{13}S_{32}\tilde{A}_A\tilde{A}_{Rn}\tilde{A}_1 + S_{23}S_{11}S_{32}\tilde{A}_A\tilde{A}_{Rn}\tilde{A}_1 - \\ & - S_{23}S_{32}\tilde{A}_A\tilde{A}_{Rn} + S_{33}S_{11}\tilde{A}_{Rn}\tilde{A}_1A - S_{33}\tilde{A}_{Rn}A + \\ & + S_{33}S_{11}\tilde{A}_{Rn}\tilde{A}_1A - S_{33}\tilde{A}_{Rn}A - S_{11}\tilde{A}_1A + A, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} F = & -D \times M \times A \times S_{42}\tilde{A}_AS_{11}CL\tilde{A}_1 + S_{42}\tilde{A}_AC \times L - \\ & - S_{21}S_{42}\tilde{A}_A\tilde{A}_1K \times C - A \times M \times S_{42}\tilde{A}_A + \\ & + A \times (A \times M \times S_{43}\tilde{A}_{Rn}(S_{11}\tilde{A}_1 - 1), \end{aligned} \quad (6)$$

$$N = -S_{41}^{(i)}E_1^{(i)} - S_{42}^{(i)}E_A - S_{43}^{(i)}\tilde{A}_{Rn} - S_{44}^{(i)}\tilde{A}_4, \quad (7)$$

$$\begin{aligned} W = & -S_{41}\tilde{A}_1 \times G - (S_{11}\tilde{A}_1 - 1)(S_{42}\tilde{A}_A - S_{42}\tilde{A}_A(R \times \\ & \times Q - T)) - S_{43}\tilde{A}_{Rn}Q + (S_{44}\tilde{A}_4 - 1) \times C \times A(S_{11}\tilde{A}_1 - 1). \end{aligned} \quad (8)$$

Представление эквивалентных констант через S – параметры обобщенного восьмиполусника с помощью формул (4) – (8) позволяет оценить их значения расчётным путём на стадии проектирования. Модель представляет собой нелинейную систему уравнений, связывающую выходные сигналы НВО с комплексными коэффициентами отражения

приемной антенны, модулятора, нагрузки и входа смесителя, а также электрическими компонентами измеряемых и паразитных шумовых сигналов.

Использование разработанной математической модели при расчетах НВО в условиях работы с низкоинтенсивными сигналами позволит получить близкие к оптимальным характеристики входных микроволновых узлов с учетом их собственных паразитных шумов и, соответственно, обеспечить минимизацию погрешностей микроволновой аппаратуры регуляторного действия.

Выводы

Разработанная математическая модель НВО позволит в процессе расчётов и дальнейшей настройки микроволновой аппаратуры регуляторного действия получить близкие к оптимальным характеристики входных микроволновых узлов с учетом их собственных паразитных шумов, сопоставимых с уровнем измеряемых сигналов и обеспечить минимизацию погрешностей данной аппаратуры.

Применение предложенной модели будет целесообразно при разработке высокочувствительных средств измерения; при реализации упрощенных алгоритмов обработки измерительной информации, а также в качестве первых приближений для точного определения констант при реализации процедуры настройки НВО. Рассмотренный подход позволяет оценить значения эквивалентных констант расчетным путем на стадии проектирования либо по результатам измерений после изготовления НВО.

Литература

1. Взаимодействие физических полей с живым веществом / Е.И. Нефедов, А.А. Протопопов, А.Н. Семенов, А.А. Яшин. – Тула: ТГУ, 1995. – 369 с.
2. Ненашева Л.П. Влияние миллиметрового излучения низкой интенсивности на репопуляционный потенциал стволовых кроветворных клеток: сборник статей / Л.П. Ненашева, В.В. Галкин, М.Б. Голант; под ред. акад. Н.Д. Девяткова и проф. О.В. Бецкого. Т. 1. – М., 1991. – С. 201-205.
3. Скрипник Ю.А. Развитие представлений об излучающей и поглощающей способности биологических объектов в диапазоне сверхвысоких частот / Ю.А. Скрипник, А.Ф. Яненко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 1999. – № 2. – С. 135-138.
4. Дубовская И. Г. Принципы моделирования и схемотехнической реализации низкоинтенсивной КВЧ диагностической и терапевтической аппаратуры / И.Г. Дубовская, Н.Е. Житник, А.В. Миронов // Вестник новых медицинских технологий. – 1996. – Т. 3, № 2. – С. 85-90.
5. Микроволновая радиометрия физических и биологических объектов / Ю.А. Скрипник, А.Ф. Яненко, В.Ф. Манойлов, В.П. Куценко, Ю.Б. Гимпильевич /

Под ред. Ю.А. Скрипника. – Житомир: Волинь, 2003. – 408 с.

6. Головка Д.Б. Надвисокочастотні методи та засоби вимірювання фізичних величин: навчальний посібник / Д.Б. Головка, Ю.О. Скрипник, О.П. Яненко. – К.: Либідь. – 2003. – 327 с.

7. Ситько С.П. Экспериментальное исследование излучения некоторых объектов в мм-диапазоне / С.П. Ситько, Ю.А. Скрипник, А.Ф. Яненко // Фізика живого. – 1998. – Т. 6, № 1. – С. 15-18.

8. Куценко В.П. Оптимізація параметрів енергетичного впливу на біологічні об'єкти / В.П. Куценко // Вісник Донецького національного університету. Серія А „Природничі науки”. – Вип. 2. – Донецький національний університет, 2009. – С. 219-223.

9. Куценко В.П. Снижение погрешностей радиометрических СВЧ-измерений при исследовании биообъектов / В.П. Куценко // Вісник Донецького національного університету. Серія А „Природничі науки”. – Вип. 1. – Донецький національний університет, 2007. – С. 197-201.

10. Kutsenko W.P. Control-measuring complex / W.P. Kutsenko, N.F. Tregubov // Вісник Черкаського державного технологічного університету. Спецвипуск. – Черкаси: Брама Україна, 2009. – С. 57-59.

11. Хавалиц И.И. Повышение эффективности микроволновой аппаратуры регуляторного действия на биофизические показатели человека / И.И. Хавалиц // Мат. IV міжн. НПК молодих учених, аспірантів, студентів „Сучасна інформаційна Україна: інформатика, економіка, філософія” – Донецьк: „Вебер”, 2010. – С. 329-332.

12. Силаев М.А. Приложение матриц и графиков к анализу СВЧ устройств / М.А. Силаев, С.Ф. Брянцев. – М.: Сов. Радио, 1970. – 248 с.

13. Альтман Дж.Л. Устройства сверхвысоких частот: перевод с англ. / Дж. Л. Альтман; под ред. проф. Н.В. Лебедева. – М.: Мир, 1968. – 482 с.

Поступила в редакцию 15.11.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой радиофизики В.В. Данилов, Донецкий национальный университет, Донецк.

МІНІМІЗАЦІЯ ПОХИБОК МІКРОХВИЛЬОВОЇ АПАРАТУРИ РЕГУЛЯТОРНОЇ ДІЇ

І.І. Хавалиць, В.П. Куценко

Для мінімізації похибок мікрохвильової апаратури регуляторного дії розроблена математична модель спрямованого волноводного відгалужувача. Особливістю проведеного моделювання відгалужувача є розгляд його роботи у вхідних ланцюгах даного радіометричного пристрою, побудованого за радарним принципом, в умовах низькоінтенсивних сигналів, рівень потужності яких порівнюємо з «паразитних» шумами вхідних елементів. Моделювання проведено з використанням матриці розсіювання, визначені вирази для відображених нормованих хвиль і для узагальнених комплексних констант, що характеризують в цілому спрямований відгалужувач, як параметричний восьмиполусник в і-му стаціонарному стані. Отримані результати дозволяють в процесі розрахунків і подальшої настройки мікрохвильової апаратури регуляторного дії одержати близькі до оптимальних характеристик вхідних мікрохвильових вузлів.

Ключові слова: електромагнітне випромінювання, біооб'єкт, мікрохвильова апаратура регуляторної дії, спрямований хвильоводний відгалужувач, матриця розсіювання, падаючі і відбиті хвилі, низькоінтенсивні сигнали.

MINIMIZING ERRORS IN MICROWAVE EQUIPMENT REGULATORY ACTION

I.I. Khavalyts, W.P. Kutsenko

To minimize errors in microwave devices regulatory actions developed a mathematical model of a waveguide directional coupler. Peculiarities of modeling the coupler is to review its operation in the input circuits of the radiometric devices built on the principle of radar, in a low-intensity signals, the power level which is commensurate with the "parasitic" noise of the input elements. Simulation is carried out using a matrix, defined by the normalized expression for the reflected waves and generalized complex constants that characterize the overall directional coupler as a parametric vosemipolusnik in the i-th stationary state. The results obtained allow to process payments and further customize the microwave equipment regulatory action to get close to optimal input characteristics of microwave components.

Key words: electromagnetic radiation, biological objects, microwave devices regulatory action aimed waveguide coupler scattering matrix, the incident and reflected waves, low-intensity signals.

Хавалиць Иван Иванович – магистрант кафедры системного анализа и моделирования, Государственный университет информатики и искусственного интеллекта, Донецк, Украина, e-mail: pass_port@inbox.ru.

Куценко Владимир Петрович – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры системного анализа и моделирования, Государственный университет информатики и искусственного интеллекта, Донецк, Украина, e-mail: donetsk50@mail.ru.