

УДК 621.374.4

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УМНОЖИТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ В ДИАПАЗОНЕ 120–220 ГГц

М.А. БОРОВСКАЯ, В.П. ЛИПАТНИКОВ, М.М. КАСПЕРОВИЧ,
А.М. КОСТРИКИН, А.В. ГУСИНСКИЙ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 9 января 2018

Аннотация. Рассмотрены особенности конструкции и принципа работы удвоителей частоты в диапазоне частот 120–220 ГГц. Приведены результаты измерений входной и выходной мощности удвоителей частоты, рассчитаны значения их коэффициентов передачи по мощности. Разработана методика измерений и оценки результатов отклонения коэффициента передачи по мощности удвоителей частоты. Исследованы зависимости коэффициентов передачи по мощности от значения выходной мощности удвоителей.

Ключевые слова: удвоитель частоты, конструкция, копланарный, щелевой, мощность, коэффициент передачи по мощности, неопределенность измерений.

Abstract. The features of the design and the operation principle of frequency doublers in range 120–220 GHz are considered. The results of input and output power measurements of frequency doublers are given, the values of them efficiency factors are calculated. A technique for measuring and estimating the results of the deviation of the efficiency is developed. The dependence of the transmission coefficients from the value of the output power of the frequency doublers is investigated.

Keywords: frequency doubler, design, coplanar, crevice, power, power transmission coefficients, uncertainty of measurement.

Doklady BGUIR. 2018, Vol. 112, No. 2, pp. 47-53

Investigation of main characteristics of frequency multipliers in the range of 120–220 GHz

M.A. Borovskaya, V.P. Lipatnikov, M.M. Kasperovich, A.M. Kostrikin, A.V. Gusinskiy

Введение

В последние годы активно проводятся исследования и разработки, связанные с коротковолновой частью миллиметрового диапазона волн. Это обусловлено применением миллиметровых и субмиллиметровых волн в научных исследованиях, для зондирования атмосферы в метеорологии, в медицине, в радиоастрономии, биологии и других областях. Во всех этих исследованиях для решения измерительной задачи необходимо использовать генераторы сигналов, векторные и скалярные анализаторы цепей, в составе которых широко применяются умножители частоты для кратного преобразования (умножения) частоты входного сигнала.

На отечественном рынке до некоторого времени отсутствовали устройства умножения частоты, в связи с чем в Центре 1.9 НИЧ БГУИР была поставлена задача разработки и исследования основных характеристик удвоителей частоты, работающих в диапазоне частот 120–220 ГГц.

Целью исследования является получение зависимостей коэффициента передачи по мощности удвоителей η от частоты выходного сигнала $F_{\text{вых}}$.

Принцип работы и элементная база исследуемых удвоителей частоты

Внешний вид рассматриваемых удвоителей частоты представлен на рис. 1.



Рис. 1. Удвоители частоты: *a* – в диапазоне частот 120–160 ГГц; *б* – в диапазоне частот 150–180 ГГц; *в* – в диапазоне частот 140–220 ГГц

В диапазоне СВЧ (миллиметровые и субмиллиметровые длины волн) наибольшее применение находят умножители на СВЧ диодах с барьером Шоттки, которые имеют малое прямое падение напряжения, что позволяет подавать на вход достаточно слабые сигналы, а если использовать диоды СВЧ, то и рабочий диапазон устройства смещается в область сверхвысоких частот [1]. Работа исследуемых умножителей частоты основана на эффекте удвоения частоты по схеме двухполупериодного выпрямления [2, 3]. Эквивалентная схема данных удвоителей частоты представлена на рис. 2.

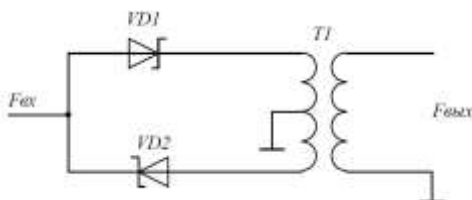


Рис. 2. Эквивалентная схема исследуемых удвоителей частоты

Конструктивно удвоитель частоты выполнен в виде комбинации двух линий передачи (см. рис. 3): входной – копланарного волновода (3) и выходной – щелевой линии (5), между которыми установлены два диода с барьером Шоттки 3A-147-A (4). Входной сигнал поступает со входа волновода (1) сечением 2,4×1,2 мм на копланарную линию через индуктивный зонд (2) и далее проходит на диоды удвоителя. Выходной сигнал возбуждается в щелевой линии, расположенной в волноводе сечением 1,6×0,8 мм. Входной и выходной волноводы разделены между собой металлической перемычкой (6), обеспечивающей развязку входного и выходного волноводов. Элементы конструкции удвоителя выполнены на диэлектрической подложке «RT DUROID» толщиной 0,127 мм, размещенной в разрезе по центру широкой стенки волновода.

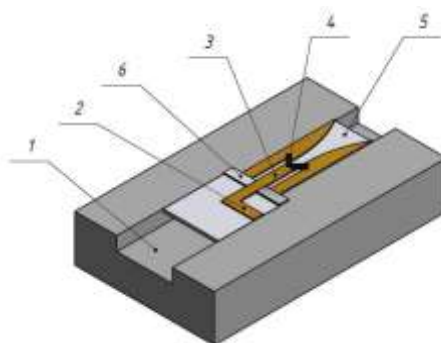


Рис. 3. Эскиз конструкции удвоителя частоты

Работа умножителей частоты характеризуется рядом параметров:

- коэффициентом умножения;
- входной ($P_{вх}$) и выходной ($P_{вых}$) мощностью;
- коэффициентом передачи по мощности (η), иногда его называют эффективностью

умножителя:
$$\eta = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} \cdot 100\%;$$

- полосой рабочих частот F и т. д.

Методика измерения коэффициента передачи по мощности исследуемых удвоителей частоты

Для проведения исследования была собрана измерительная установка на базе приборов, находящихся в ведении Центра 1.9 НИЧ БГУИР, структурная схема которой представлена на рис. 4.

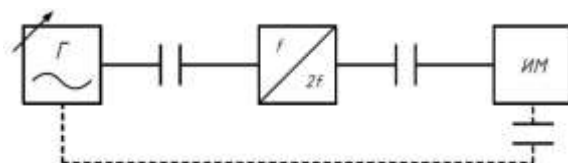


Рис. 4. Схема измерения характеристик умножителей частоты

В качестве источника входного сигнала использовались генераторы СВЧ сигналов Г4-186 (для диапазона частот 53,57–78,33 ГГц) и РГ4-14 (для диапазона частот 78,33–118,10 ГГц). Для измерения мощности входного и выходного СВЧ сигналов применялся ваттметр поглощаемой мощности МЗ-75 с преобразователями ПП-14 (в диапазоне частот 53,57–78,33 ГГц), ПП-15 (в диапазоне частот 78,33–118,10 ГГц), ПП-16 (в диапазоне частот 118,10–220 ГГц).

Обработка результатов измерений состояла в определении значения измеряемой физической величины и неопределенности результата измерения [4].

Для оценки результатов отклонения расчетного значения коэффициента передачи по мощности (η) удвоителей частоты была составлена следующая функция измерений (1):

$$\eta = \frac{P_2(1 + \delta_{P_2}) \cdot (1 + \delta_{\text{рас}2}) \cdot (1 + \delta_{\text{НГ}})}{P_1(1 + \delta_{P_1}) \cdot (1 + \delta_{\text{рас}1})} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где P_1 , P_2 – измеренные входная и выходная мощность, мВт; δ_{P_1} , δ_{P_2} – неопределенность измерения входной и выходной мощности исследуемого преобразователя частоты, отн. ед.; $\delta_{\text{рас}1}$, $\delta_{\text{рас}2}$ – неопределенность измерения, обусловленная рассогласованием в измерительном тракте, отн. ед.; $\delta_{\text{НГ}}$ – неопределенность измерения, обусловленная нестабильностью генератора входного сигнала, отн. ед.

В табл. 1 приведен анализ величин, входящих в функцию измерения коэффициента передачи по мощности удвоителей частоты СВЧ диапазона.

Коэффициенты чувствительности, принятые при расчетах:

$$c(P_2) = \frac{1}{P_1} \cdot 100\%,$$

$$c(P_1) = -\frac{P_2}{P_1^2} \cdot 100\%,$$

$$c(\delta_{P_2}) = c(\delta_{\text{рас}2}) = c(\delta_{\text{НГ}}) = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\%,$$

$$c(\delta_{P_1}) = -\frac{P_2}{P_1 \cdot (\delta_{P_1} + 1)^2} \cdot 100\%,$$

$$c(\delta_{\text{рас}1}) = -\frac{P_2}{P_1 \cdot (\delta_{\text{рас}1} + 1)^2} \cdot 100\%$$

Принимая входные величины как некоррелированные, можно записать расширенную неопределенность результата измерения (U_η) как

$$U_\eta = k \cdot u_c(\eta) = k \cdot \sqrt{\sum_{j=1}^m c_j^2 u^2(x_j)}, \quad (2)$$

где k – коэффициент охвата. При нормальном законе распределения для уровня доверия $p = 95\%$ коэффициент охвата $k = 2$.

Таблица 1. Анализ входных величин

Входная величина	Характеристики
P_1, P_2	<p>Тип неопределенности: А Вид распределения: нормальное Оценка величины: $\bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i$, мВт, где P_i – результат i-го наблюдения, n – количество наблюдений Стандартная неопределенность: $u(\bar{P}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}$</p>
δ_{P1}, δ_{P2}	<p>Тип неопределенности: В Вид распределения: прямоугольное Оценка величины: 0 Интервал, в котором находится значение входной величины: $\pm a_1$ – определяется пределами основной погрешности измерения применяемого ваттметра поглощаемой мощности МЗ-75: в диапазоне измерения мощности от 1 мкВт до 10 мкВт – $\pm [15 + 0,25 \cdot (P_x/P_x - 1)] \%$; в диапазоне измерения мощности от 10 мкВт до 10 мВт – $\pm 10 \%$ Стандартная неопределенность: $u(\delta_p) = \frac{a_1 / 100 \%}{\sqrt{3}}$</p>
$\delta_{\text{оап1}}, \delta_{\text{оап2}}$	<p>Тип неопределенности: В Вид распределения: арксинусоидальное Оценка величины: 0 Интервал, в котором находится значение входной величины: $\pm a_2 = \pm 2 \cdot \Gamma_1 \cdot \Gamma_2$, где Γ_1 – модуль коэффициента отражения выхода генератора/умножителя, Γ_2 – модуль коэффициента отражения входа измерителя мощности (ГОСТ 20271.1-91) Стандартная неопределенность: $u(\delta_{\text{рас}}) = \frac{a_2}{\sqrt{2}}$</p>
δ_{Γ_A}	<p>Тип неопределенности: В Вид распределения: прямоугольное Оценка величины: 0 Интервал, в котором находится значение входной величины: $\pm a_3$ – определяется пределами нестабильности уровня выходного сигнала генератора – 1 % Стандартная неопределенность: $u(\delta_{\text{нГ}}) = \frac{a_3 / 100 \%}{\sqrt{3}}$</p>

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

В результате измерений были получены характеристики умножителей частоты, представленные в табл. 2–4.

Таблица 2. Результаты измерений удвоителя частоты в диапазоне частот 140–220 ГГц

$F_{\text{вх}}$, ГГц	$F_{\text{вых}}$, ГГц	P_1 , мВт	P_1 , дБм	P_2 , мВт	P_2 , дБм	η , %
70	140	7,902	8,977	0,046	-13,372	0,6
71,5	143	11,229	10,503	0,132	-8,794	1,2
72,5	145	12,31	10,903	0,358	-4,461	2,9
75	150	14,556	11,63	0,751	-1,244	5,2
77,5	155	13,724	11,375	0,573	-2,418	4,2
78,33	156,6	8,643	9,367	0,596	-2,248	6,9
80	160	9,417	9,739	0,362	-4,413	3,8
82,5	165	10,249	10,107	0,414	-3,83	4,0
85	170	11,318	10,538	0,227	-6,44	2,0
87,5	175	12,21	10,867	0,266	-5,751	2,2
89,3	178,6	13,338	11,251	0,195	-7,1	1,5
92,5	185	13,814	11,403	0,107	-9,706	0,8
95	190	14,387	11,58	0,203	-6,925	1,4
97,5	195	13,993	11,459	0,138	-8,601	1,0
100	200	13,614	11,34	0,272	-5,654	2,0
102,5	205	13,636	11,347	0,433	-3,635	3,2
105	210	13,74	11,38	0,687	-1,63	5,0
107,5	215	13,369	11,261	0,734	-1,343	5,5
110	220	13,245	11,22	1,535	1,861	11,6

Таблица 3. Результаты измерений удвоителя частоты в диапазоне частот 150–180 ГГц

$F_{\text{вх}}$, ГГц	$F_{\text{вых}}$, ГГц	P_1 , мВт	P_1 , дБм	P_2 , мВт	P_2 , дБм	η , %
78,33	156,6	8,644	9,367	0,619	-2,083	7,2
80	160	9,417	9,739	0,47	-3,279	5,0
82,5	165	10,249	10,107	0,701	-1,543	6,8
85	170	11,319	10,538	0,462	-3,354	4,1
87,5	175	12,21	10,867	0,38	-4,202	3,1
89,3	178,6	13,338	11,251	0,208	-6,819	1,6

Таблица 4. Результаты измерений удвоителя частоты в диапазоне частот 120–160 ГГц

$F_{\text{вх}}$, ГГц	$F_{\text{вых}}$, ГГц	P_1 , мВт	P_1 , дБм	P_2 , мВт	P_2 , дБм	η , %
60,0	120	12,809	11,075	0,909	-0,414	7,1
62,5	125	12,311	10,903	0,892	-0,496	7,3
64,6	129,2	12,642	11,018	0,86	-0,655	6,8
67,5	135	10,397	10,169	0,806	-0,937	7,8
70,0	140	7,901	8,977	0,813	-0,899	10,3
71,5	143	11,228	10,503	1,003	0,013	8,9
72,5	145	12,311	10,903	0,765	-1,163	6,2
75,0	150	14,555	11,63	0,589	-2,299	4,1
77,5	155	13,725	11,375	0,529	-2,765	3,9
78,33	156,6	8,644	9,367	0,149	-8,268	1,7
80	160	9,417	9,739	0,217	-6,635	2,3

Для наглядности влияния входных величин на точность измерения в табл. 5 приведен бюджет неопределенности полученных результатов коэффициента передачи по мощности удвоителя частоты в диапазоне частот 140–220 ГГц.

Таблица 5. Бюджет неопределенности

Величина X_j	Единица измерения	Значение x_j	Интервал +/-	Тип неопределенности	Распределение вероятностей	Стандартная неопределенность $u(x_j)$	Коэффициент чувствительности c_j	Вклад в неопределенность $u_j(y)$	Процентный вклад, %
P_1	мВт	10,2	–	A	норм.	–	–	–	–
P_2	мВт	0,41	–	A	норм.	0,001	9,757	0,010	0,02
δ_{P_1}	отн. ед	–	0,100	B	прям.	0,058	-4,039	-0,233	10,1
δ_{P_2}	отн. ед	–	0,100	B	прям.	0,058	4,039	0,233	10,1
$\delta_{\text{дан}1}$	отн. ед	–	0,056	B	арксин.	0,039	-4,039	-0,158	4,62
$\delta_{\text{дан}2}$	отн. ед	–	0,056	B	арксин.	0,157	4,039	0,634	74,8
δ_{f_A}	отн. ед	–	0,010	B	прям.	0,006	4,039	0,023	0,09
Суммарная стандартная неопределенность						0,733	–	–	–

После обработки результатов измерений по вышеприведенной методике получили следующие графики зависимости коэффициента передачи по мощности (η) удвоителей частоты от частоты выходного сигнала ($F_{\text{вых}}$).

Из графиков и таблиц измерений видно, что среднее значение коэффициента передачи по мощности удвоителей частоты лежит в области от 1 до 12 %, имея локальные минимумы и максимумы, обусловленные разбросом уровня входной мощности. Однако на большей части рабочего диапазона частот среднее значение коэффициента передачи по мощности удвоителей частоты имеет значение на уровне 3–7 %. Значения выходной мощности сигнала исследуемых удвоителей частоты лежат в диапазоне от 0 до -9 дБм, что обусловлено малой мощностью входного сигнала (от 9 до 12 дБм). Удвоители частоты с полученными характеристиками могут применяться при построении СВЧ измерительных трактов скалярных и векторных анализаторов цепей, которые работают на малых уровнях мощности сигналов.

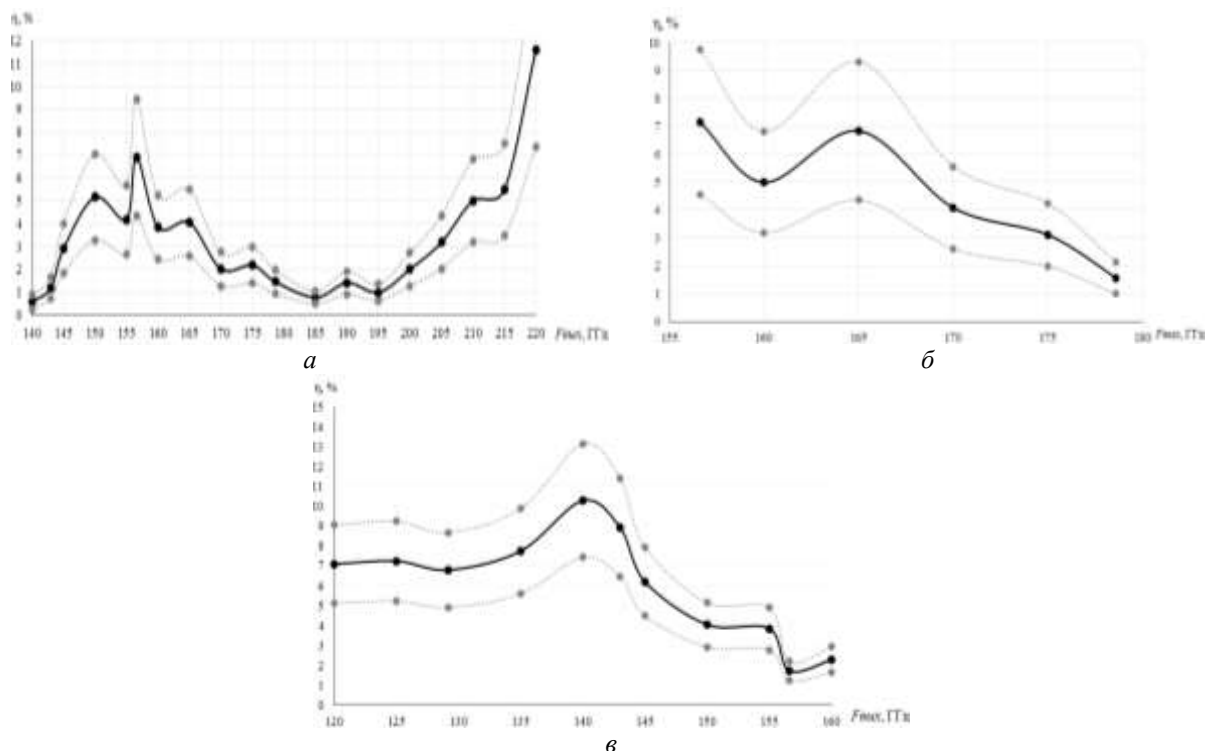


Рис. 5. Зависимость коэффициента передачи по мощности от частоты выходного сигнала удвоителя частоты: *а* – в диапазоне частот 140–220 ГГц; *б* – в диапазоне частот 150–180 ГГц; *в* – в диапазоне частот 120–160 ГГц

Заключение

Используя недорогую и доступную элементную базу и относительно простую конструкцию, в Центре 1.9 НИЧ БГУИР разрабатываются удвоители частоты в диапазоне частот 120–220 ГГц. Основываясь на результатах исследования, можно утверждать, что коэффициент передачи по мощности и уровень мощности выходного сигнала рассматриваемых устройств позволяет широко применять их в СВЧ измерительных трактах приборов, обеспечивая нормальную работоспособность средств измерений. На отечественном рынке СВЧ изделий больше не представлено производителей удвоителей частоты в диапазоне частот 120–220 ГГц. Анализ зарубежного рынка производителей СВЧ элементов показал высокую конкурентоспособность рассматриваемых удвоителей частоты по техническим и экономическим параметрам.

Список литературы

1. Гусятинер М.С., Горбачев А.И. Полупроводниковые сверхвысокочастотные диоды. М.: Радио и связь, 1983. 224 с.
2. Хелзайн Дж. Пассивные и активные цепи СВЧ. Пер. с англ. / Под ред. А.С. Галина. М.: Радио и связь, 1981. 200 с.
3. Андреев В.С. Теория нелинейных электрических цепей: учеб. пособие для вузов. М.: Радио и связь, 1982. 280 с.
4. Руководство по выражению неопределенности измерения. СПб., 1999. 126 с.

References

1. Gusjatiner M.S., Gorbachev A.I. Poluprovodnikovye sverhvysochastotnye diody. M.: Radio i svjaz', 1983. 224 s. (in Russ.)
2. Helzajn Dzh. Passivnye i aktivnye cepi SVCh. Per. s angl. / Pod red. A.S. Galina. M.: Radio i svjaz', 1981. 200 s. (in Russ.)
3. Andreev V.S. Teorija nelinejnyh jelektricheskikh cepej: ucheb. posobie dlja vuzov. M.: Radio i svjaz', 1982. 280 s. (in Russ.)
4. Rukovodstvo po vyrazheniju neopredelennosti izmerenija. SPb., 1999. 126 s. (in Russ.)

Сведения об авторах

Боровская М.А., аспирант кафедры защиты информации, ведущий инженер Центра 1.9 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Липатников В.П., ведущий инженер-электроник Центра 1.9 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Касперович М.М., научный сотрудник Центра 1.9 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Кострикин А.М., к.т.н., заместитель директора Центра 1.9 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Гусинский А.В., к.т.н., директор Центра 1.9 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный
университет информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-294-55-08;
e-mail: borovskaya_m@mail.ru
Боровская Марина Анатольевна

Information about the authors

Borovskaya M.A., PG student of information security department, senior engineer of the Center 1.9 of R&D department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Lipatnikov V.P., senior electronics engineer of the Center 1.9 of R&D Department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Kasperovich M.M., researcher of the Center 1.9 of R&D department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Kostrikin A.M., PhD, deputy director of the Center 1.9 of R&D department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Gusinskiy A.V., PhD, director of the Center 1.9 of R&D Department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka st., 6,
Belarusian state university
of informatics and radioelectronics
tel. +375-17-294-55-08;
e-mail: borovskaya_m@mail.ru
Borovskaya Marina Anatolievna