

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ BRIEF REPORTS

УДК 621.382.029

DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-1-93-98

Выборочные распределения субмодулей выходных усилителей мощности АФАР Х-диапазона по энергетическим параметрам

В.А. Сергеев^{1,2}, Р.Г. Тарасов^{2,3}, А.А. Куликов^{1,2}

¹Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, г. Ульяновск, Россия

²Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск, Россия

³АО «НПП «Завод Искра», г. Ульяновск, Россия

sva@ulstu.ru

Во многих радиотехнических системах нашли широкое применение СВЧ-усилители мощности на основе монолитных интегральных схем, особенно в выходных усилителях мощности (ВУМ) приемо-передающих модулей АФАР.

Показано, что выборочные распределения субмодулей ВУМ приемо-передающих модулей АФАР Х-диапазона по минимальной и максимальной выходной мощности и по максимальному коэффициенту стоячей волны имеют двухмодальный характер, что свидетельствует о наличии превалирующих факторов качества сборки, приводящих к появлению второй моды. Распределение субмодулей ВУМ по минимальному коэффициенту стоячей волны близко по виду к экспоненциальному закону распределения, а по току потребления – к нормальному закону распределения с малым относительным среднеквадратическим отклонением. Отсутствие значимой корреляции между значением потребляемого тока и уровнем минимальной выходной мощности означает, что разброс по уровню минимальной выходной мощности определяется качеством сборки ВУМ, а не качеством монолитных интегральных схем.

Близкий к нормальному закону вид распределения ВУМ по току потребления и небольшое относительное значение среднеквадратического отклонения свидетельствуют о достаточно высокой однородности выборки субмодулей по качеству монолитных интегральных схем.

Ключевые слова: приемо-передающий модуль; выходной усилитель мощности; выходная мощность; коэффициент стоячей волны; потребляемый ток; выборочные распределения; двухмодальный характер; качество сборки.

Для цитирования: Сергеев В.А., Тарасов Р.Г., Куликов А.А. Выборочные распределения субмодулей выходных усилителей мощности АФАР Х-диапазона по энергетическим параметрам // Изв. вузов. Электроника. – 2018. – Т. 23. – № 1. – С. 93–98. DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-1-93-98

Sampling Distributions of Output Power Amplifiers of X-Band Active Phased Array Antennas on Power Parameters

V.A. Sergeev^{1,2}, R.G. Tarasov^{2,3}, A.A. Kulikov^{1,2}

¹*Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics (Ulyanovsk branch), Russian Academy of Sciences, Ulyanovsk, Russia*

²*Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia*

³*JSC «SPC and Production Plant Iskra», Ulyanovsk, Russia*

sva@ulstu.ru

In many radiotechnical systems the microwave power amplifiers based on the monolithic integrated circuits, especially in the output power amplifiers (OPA) of transceiving modules AFAR, have become commonly used.

It has been shown that selective distributions of the submodules of the output power amplifiers (OPA) of the APAL transceiving modules of the AFAR X-range on minimum and maximum output power and also on the maximum standing wave ratio (SWR) have a two-modal character, that demonstrates the existence of the prevailing factors of the assembly quality, leading to an appearance of the second mode. The distribution of the OPA submodules on the standing wave ratio by the form is close to the exponential distribution law, and on the consumed current – to the normal distribution law with a small relative average quadratic deviation. The absence of significant correlation between the consumed current and the level of the minimum output power means that the dispersion is determined by the level of the minimum output power but not by the quality of the OPA assembly, and not by the quality of monolithic integrated circuits.

Keywords: transceiving modules; output power amplifiers; output power; standing wave ratio; consumed current; selective distributions; two-modal character; quality of assembly.

For citation: Sergeev V.A., Tarasov R.G., Kulikov A.A. Sampling distributions of output power amplifiers of X-band active phased array antennas on power parameters // Proc. of Universities. Electronics. – 2018. – Vol. 23. – № 1. – P. 93–98. DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-1-93-98

СВЧ-усилители мощности на основе монолитных интегральных схем (МИС) используются во многих радиотехнических системах и определяют такие важнейшие тактико-технические параметры систем, как потребляемая и излучаемая мощность, ширина полосы рабочих частот, надежность и стоимость. Наиболее широкое применение СВЧ МИС нашли в выходных усилителях мощности (ВУМ) приемо-передающих модулей (ППМ) АФАР [1, 2]. Импульсная мощность современной типичной GaAs МИС в составе ППМ АФАР X-диапазона (10 ГГц) составляет ~ 10 Вт, средняя – 1...3 Вт [1]. В состав одной АФАР может входить до нескольких тысяч ППМ. Именно энергетические параметры ВУМ (выходная мощность, потребляемый ток и КПД) определяют полную излучаемую решеткой мощность и требования по отводу тепла.

Ключевая задача в условиях серийного производства ППМ АФАР X-диапазона – повышение качества и процента выхода годных изделий. Для предварительного анализа факторов, определяющих характеристики субмодулей ВУМ X-диапазона с двумя параллельно включенными GaAs МИС, рассмотрены выборочные распределения субмодулей по энергетическим параметрам. Вид и параметры выборочных распределений представляют интерес для оценки разброса характеристик конечных изделий при проектировании, а также несут информацию о характере влияющих на качество изделий факторов [3].

На специализированном измерительном комплексе производства Rohde Schwarz в диапазоне 9,5 – 10,5 ГГц при длительности импульсов 5 мкс, скважности 10 и напряжении источника питания 8 В проводились измерения следующих параметров субмодулей ВУМ: ток потребления $I_{\text{пот}}$, минимальный и максимальный коэффициент стоячей волны ($K_{\text{СВН}_{\text{min}}}$ и $K_{\text{СВН}_{\text{max}}}$) по

входу; минимальная $P_{\min}$ и максимальная $P_{\max}$ выходная мощность; причем ВУМ с минимальной выходной мощностью меньше 13 Вт (41 dBm) подлежали отбраковке. КПД субмодулей η рассчитывался как отношение минимальной выходной мощности к импульсной мощности, потребляемой от источника питания. Количественные характеристики выборочных распределений субмодулей ВУМ по указанным параметрам приведены в таблице.

Характеристики выборочных распределений субмодулей ВУМ по энергетическим параметрам
Characteristics of sampling distribution of output power amplifiers submodules on power parameters

Параметр распределения	Контролируемый параметр субмодуля ВУМ					
	$P_{\min}$, Вт	$P_{\max}$, Вт	КСВН _{max}	КСВН _{min}	$I_{\text{пот}}$, А	η , %
Среднее значение	14,6	16,5	1,31	1,11	9,0	20,4
Среднеквадратическое отклонение (процент от среднего значения)	0,5 (3,4 %)	0,6 (3,6 %)	0,08 (6,1 %)	0,09 (8,2 %)	0,25 (2,8 %)	0,9 (4,4 %)

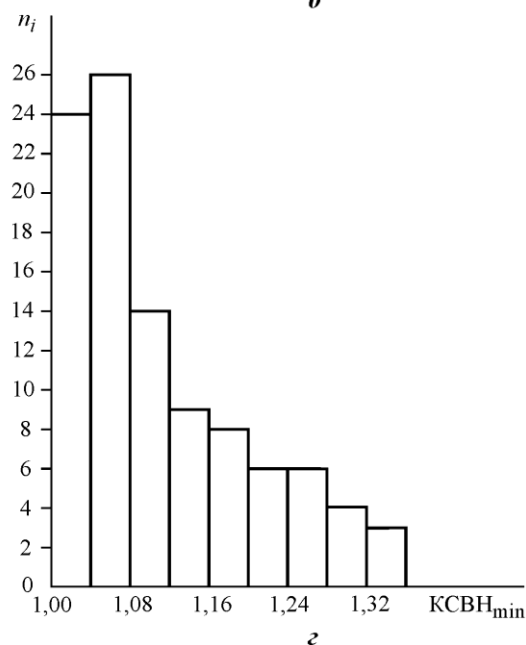
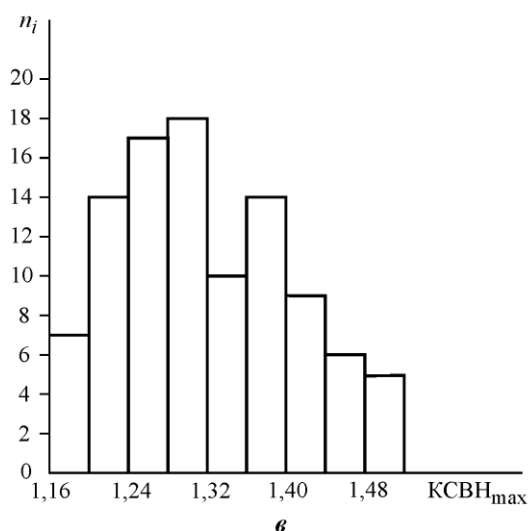
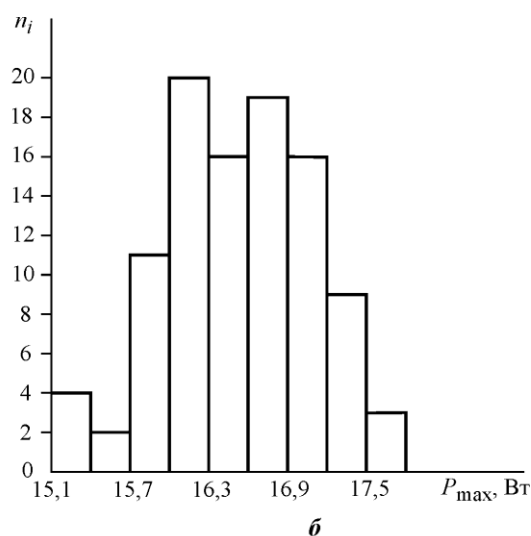
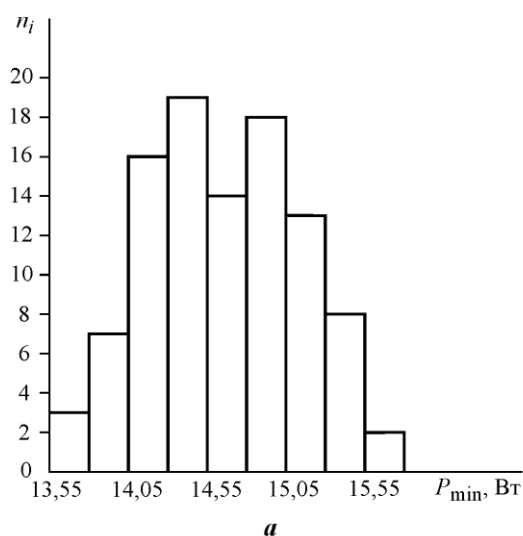


Рис.1. Гистограммы распределения субмодулей ВУМ по минимальной (а) и максимальной (б) выходной мощности и по максимальному (в) и минимальному (г) КСВН
 Fig.1. Histograms of output power amplifiers submodules distributions on the minimum (a) and maximum (b) output power and on the maximum (c) and minimum (d) voltage standing-wave ratio

Гистограмма распределения (рис.1,а,б) по уровню выходной мощности $P_{\min}$ и $P_{\max}$ 100 субмодулей ВУМ, прошедших выходной контроль, имеет двухмодальный характер, что свидетельствует о преобладающих факторах влияния на уровень выходной мощности ВУМ. Аналогичный двухмодальный характер проявляется в распределении мощных биполярных транзисторов по уровню теплового сопротивления $R_{\text{т}}$ переход-корпус, при этом процент отказа при испытаниях транзисторов, находящихся в моде с повышенным $R_{\text{т}}$, в несколько раз больше, чем при испытаниях транзисторов, находящихся в моде с меньшим $R_{\text{т}}$ [3]. Возможно, двухмодальность распределения ВУМ по уровню $P_{\min}$ также указывает на тепловую причину снижения выходной мощности ВУМ [4].

Распределение ВУМ по КСВН_{max} (рис.1,в) тоже имеет двухмодальный характер; при этом факторы, приводящие к повышению КСВН, вероятнее всего, связаны с качеством монтажа СВЧ-трактов субмодуля, а не с тепловыми процессами, поскольку коэффициент корреляции ρ между КСВН_{max} и $P_{\min}$ близок к нулю ($\rho = -0,09$).

Характер распределения ВУМ по значениям параметра $(\text{КСВН}_{\min}-1)$ близок к экспоненциальному закону распределения: $f(x) = \lambda \exp(-\lambda x)$ [5], о чем свидетельствует примерное равенство выборочного среднего значения и среднеквадратического отклонения (СКО) $((\text{КСВН}_{\min}-1)_{\text{ср}} \approx 0,11$; $\text{СКО} \approx 0,092$). Такой закон распределения характерен для распределения изделий по размерам дефектов [6]. Следовательно, экспоненциальное распределение по уровню КСВН косвенно указывает на связь этого параметра с плотностью дефектов в подложке и СВЧ-трактах. При этом КСВН_{min} значимо коррелирует с максимальной выходной мощностью $P_{\max}$ ($\rho = 0,38$).

Распределение ВУМ по току потребления является одномодальным, близким к нормальному (рис.2), со средним значением 9 А и относительно небольшим СКО ($\sim 2,8$ % от среднего значения), что свидетельствует об однородности выборки по качеству МИС, поскольку именно МИС является активным элементом, потребляющим ток. При этом ток потребления заметно коррелирует с максимальной выходной мощностью ($\rho = 0,26$) и практически не коррелирует с $P_{\min}$.

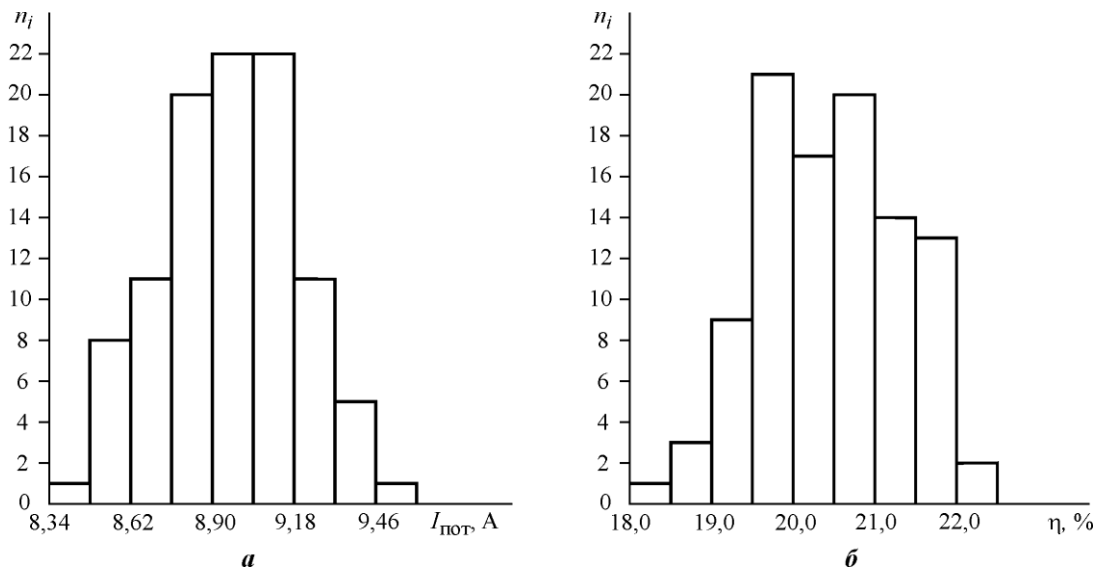


Рис.2. Распределение субмодулей ВУМ по току потребления (а) и КПД (б)
Fig.2. Distributions of output power amplifiers submodules on consumption current (a) and efficiency (b)

На гистограмме распределения ВУМ по КПД также можно выделить две моды, что определяется, видимо, распределением по уровню выходной мощности (коэффициент корреляции между этими параметрами 0,77).

Двухмодальный характер выборочных распределений субмодулей ВУМ по уровню $P_{\min}$ и $P_{\max}$ указывает на наличие преобладающих факторов. Параметры и характер распределения ВУМ по $P_{\min}$, вероятно, определяются тепловыми процессами, а распределение по $P_{\max}$ в большей степени определяется качеством монтажа СВЧ-трактов. Близкий к нормальному закону вид распределения ВУМ по току потребления и небольшое относительное значение СКО свидетельствуют о достаточно высокой однородности выборки субмодулей по качеству МИС.

Литература

1. **Виколов И.** Монолитные интегральные схемы СВЧ // *Электроника: Наука. Технология. Бизнес.* – 2012. – № 7. – С. 60–73.
2. Прием-передающий субмодуль X-диапазона частот / **Г.Я. Красников, А.В. Волосов, Е.Ю. Котляров и др.** // *Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника.* – 2016. – №3. – С. 23–29.
3. **Сергеев В.А.** Характеристики и особенности выборочных распределений мощных биполярных транзисторов по теплофизическим параметрам // *Известия Самарского научного центра РАН.* – 2004. – № 1. – С. 154–160.
4. **Сергеев В.А., Тарасов Р. Г. Куликов А.А.** Диагностика качества сборки выходных усилителей прием-передающих модулей АФАР методами ИК-микроскопии // *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения.* – 2016. – Т.16. – №4. – С. 192–193.
5. **Езопов А.В., Коломейцев В.А.** Электромагнитное взаимодействие компонентов приемного и передающего каналов в прием-передающих модулях АФАР X-диапазона // *Вестник Саратовского технического университета.* – 2011. – № 2 (55). – Вып. 1. – С. 17–21.
6. **Королюк В.С., Портенко Н.И., Скороход А.В., Турбин А.Ф.** Справочник по теории вероятностей и математической статистике. – М.: Наука, 1985. – 640 с.
7. **Sato H., Ikota M., Sugimoto A., Masuda H.** A new defect distribution metrology with a consistent discrete exponential formula and its applications // *IEEE Transaction Semiconductors Manufacturing.* – 1999. – Vol. 12. – No. 4. – P. 409.

Поступило 11.05.2017 г.; принято к публикации 09.11.2017 г.

Сергеев Вячеслав Андреевич – доктор технических наук, доцент, директор Ульяновского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (Россия, 432071, г. Ульяновск, ул. Гончарова, д. 48/2), заведующий базовой кафедрой радиотехники, опто- и наноэлектроники Ульяновского государственного технического университета (Россия, 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, д. 32), sva@ulstu.ru

Тарасов Руслан Геннадьевич – генеральный директор АО «НПП «Завод Искра» (Россия, 432030, г. Ульяновск, пр-т Нариманова, д. 75), соискатель базовой кафедры радиотехники, опто- и наноэлектроники Ульяновского государственного технического университета (Россия, 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, д. 32), rgtarasov@yandex.ru

Куликов Александр Александрович – ведущий инженер Ульяновского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (Россия, 432071, г. Ульяновск, ул. Гончарова, д. 48/2), аспирант базовой кафедры радиотехники, опто- и наноэлектроники Ульяновского государственного технического университета (Россия, 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, д. 32), kulikovaa36@yandex.ru

References

1. Vikulov I. Monolitnye integral'nye skhemy SVCH [Microwave Monolithic Integrated Circuits]. *Elektronika: Nauka. Tekhnologiya. Biznes – Electronics: Nauka. Technology. Bussines*, 2012, no. 7, pp. 60–73. (In Russian).
2. Krasnikov G.Ya., Volosov A.V., Kotlyarov E.Yu. et al. Priemoperedayushchij submodul' H-diapazona chastot [X-band Transmit/Receive Module]. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 3. Mikroelektronika*, 2016, no. 3, pp. 23–29. (In Russian).
3. Sergeev V.A. Harakteristiki i osobennosti vyborochnyh raspre-delenij moshchnyh bipolyarnyh tranzistorov po teplofizicheskim parametram [The Characteristics and Features of Power Bipolar Transistors Sampling Distributions on Thermal Parameters]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN – Izvestiya of Samara Science Centre of Russian Academy of Science*, 2004, no. 1, pp. 154–160. (In Russian).
4. Sergeev V.A., Tarasov R. G. Kulikov A.A. Diagnostika kachestva sborki vyhodnyh usilitelej priemo-peredayushchih modulej AFAR metodami IK-mikroskopii [Diagnostic of assembly quality of output amplifiers of PAAAs Transmit/Receive Module using IR-microscopies]. *Fundamental'nye problemy radioelektronogo priborostroeniya – Fundamental problems of radioelectronics instruments making*, 2016, vol. 16, no. 4, pp. 192–193. (In Russian).
5. Ezopov A.V. Kolomejcev V.A. Elektromagnitnoe vzaimodejstvie komponentov priemnogo i peredayushchego kanalov v priemo-peredayushchih modulyah AFAR H-diapazona [Electromagnetic interaction Receive and Transmit Chanals Components in X-band APAAs Transmit/Receive Module]. *Vestnik Saratovskogo tekhnicheskogo universiteta – Vestnik of Saratov Technical University*, 2011, no. 2 (55), iss. 1, pp. 17–21. (In Russian).
6. Korolyuk V.S., Portenko N.I., Skorohod A.V., Turbin A.F. *Spravochnik po teorii veroyatnostej i matematicheskoy statistike* [Reference book on probability theory and mathematical statistics]. Moscow, Nauka Publ., 1985, 640 p. (In Russian).
7. Sato H., Ikota M., Sugimoto A., Masuda H. A new defect distribution metrology with a consistent discrete exponential formula and its applications. *IEEE Transaction Semiconductors Manufacturing*, 1999, Vol. 12, no. 4, p. 409.

Submitted 11.05.2017; accepted 09.11.2017.

Sergeev Vyacheslav A. – Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., director of the Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics (Ulyanovsk Branch), Russian Academy of Sciences (Russia, 432071, Ulyanovsk, Goncharova str., 48/2); head of the Radio Engineering, Opto- and Nanoelectronics Department, Ulyanovsk State Technical University (Russia, 432071, Ulyanovsk, Severny Venetz str., 32), sva@ulstu.ru

Tarasov Ruslan G. – general director of JSC «SPE «Zavod «Iskra» (Russia, 432030, Ulyanovsk, Narimanova Prospekt, 75), degree applicant of the Radio Engineering, Opto- and Nanoelectronics Department, Ulyanovsk State Technical University (Russia, 432071, Ulyanovsk, Severny Venetz str., 32), rgtarasov@yandex.ru

Kulikov Aleksander A. – senior engineer, Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics (Ulyanovsk Branch), Russian Academy of Sciences (Russia, 432071, Ulyanovsk, Goncharova str., 48/2), PhD student of the Radio Engineering, Opto- and Nanoelectronics Department, Ulyanovsk State Technical University (Russia, 432071, Ulyanovsk, Severny Venetz str., 32), kulikovaa36@yandex.ru