

УДК: 621.31

DOI: 10.53816/23061456\_2022\_1-2\_58

**ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ И ЧАСТОТНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ  
АКТИВНОЙ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ  
ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СОЛНЕЧНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ЭНЕРГОСТАНЦИИ**

**FEATURES OF CONSTRUCTION AND FREQUENCY SYNCHRONIZATION  
OF AN ACTIVE PHASED ARRAY ANTENNA  
OF A PHOTOVOLTAIC SOLAR SPACE POWER STATION**

*Д-р техн. наук А.П. Алёшкин, д-р техн. наук Т.О. Мысливцев, канд. техн. наук С.В. Никифоров*

*D.Sc. A.P. Aleshkin, D.Sc. T.O. Myslivtsev, Ph.D. S.V. Nikiforov*

*Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского*

В данной статье предложены два варианта построения антенной системы синхронизатора частоты, обеспечивающие необходимые условия для функционирования солнечной активной фазированной антенной решетки (САФАР), размещенной на геостационарном носителе с рабочей частотой 2450 МГц. Представлены результаты оценки допустимой относительной нестабильности частоты синхросигнала антенной системы синхронизатора, которые свидетельствуют о практической реализуемости обоих вариантов построения. Проведенные расчеты характеристик САФАР позволяют судить о возможности передачи информации и энергии от источника на космическом носителе к потребителю на поверхности Земли (море), в космосе и воздушном пространстве.

**Ключевые слова:** автогенератор, активная фазированная антенная решетка, нестабильность частоты, солнечная космическая энергостанция, солнечные батареи, фотоэлектрический преобразователь.

This article offers two options for constructing an antenna system of a frequency synchronizer that provides the necessary conditions for the functioning of a solar active phased array antenna (SAPAA) placed on a geostationary carrier with an operating frequency of 2450 MHz. The results of the evaluation of the permissible relative instability of the frequency of the synchro signal of the antenna system of the synchronizer are presented, which indicate the practical feasibility of both construction options. The calculations of the SAFAR characteristics allow us to judge the possibility of transmitting information and energy from a source on a space carrier to a consumer on the Earth's surface (sea), in space and airspace.

**Keywords:** auto generator, active phased array antenna, frequency instability, solar space power station, solar panels, photovoltaic converter.

Современные тенденции развития технологий построения космических систем и комплексов неразрывно связаны с их энергетическими потребностями. Одним из возможных путей

обеспечения энергией таких космических систем является использование управляемого излучения в сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазоне волн. Мощное СВЧ излучение можно получить

при использовании фотоэлектрических солнечных космических энергостанций (СКЭС) [1–5], базирующихся на носителях, размещенных на геостационарной, солнечно-синхронных, высокоэллиптических и других орбитах.

В работах [6, 7] рассмотрена фотоэлектрическая СКЭС совмещенного типа с системой пространственной синхронизации частоты, построенная по схеме активной фазированной антенной решетки (АФАР) и называемая САФАР. В САФАР фотоэлектрические преобразователи солнечной энергии (ФЭП), обеспечивающие электропитание генераторов СВЧ активных модулей антенны, в отличие от разнесенных в пространстве [1] передающей АФАР и панелей солнечных батарей (СБ), объединены с АФАР, но расположены на обратной стороне конструкции по отношению к апертуре антенны. Важной спецификой в построении СКЭС с САФАР является наличие гелиостатов (основного и вспомогательного), которые позволяют ориентировать полотна антенны на Солнце.

САФАР, в целом, в зависимости от функционального назначения и уровня излучаемой мощности могут быть представлены как радиоинформационные, предназначенные для получения и передачи информации или радиоэнергетические, основным назначением которых является передача энергии от источника потребителям на Земле (море), в космосе или воздушном пространстве. Мощность излучения СКЭС в непрерывном режиме может достигать в зависимости от проекта сотен мегаватт — единиц гигаватт.

В качестве единичного активного модуля САФАР (рис. 1) был принят модуль на базе сверхвысокочастотного автогенератора (АГ), преобразующего энергию постоянного тока, вырабатываемую фотоэлектрическим преобразователем (ФЭП) в энергию СВЧ колебаний.

Колебания с выхода АГ через участок 1 – 3 циркулятора по сигналу управления (СУ) направляются на фазовращатель (Ф), а далее через участок 3 – 2 циркулятора на излучатель (И). Принятый СВЧ синхросигнал поступает через участок 2 – 3 циркулятора в СВЧ цепь АГ, осуществляя при соответствующих условиях синхронизацию его частоты. Необходимым условием функционирования рассматриваемой САФАР является обеспечение синфазности излучаемых

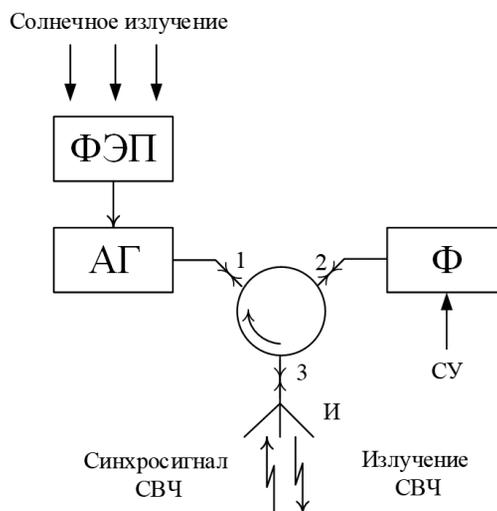


Рис. 1. Единичный активный модуль САФАР

активными модулями антенн СВЧ колебаний. Это условие выполнимо при стабильности частоты синхросигнала, нестабильность которого приводит [1] к снижению эффективности функционирования СКЭС в целом.

В рассматриваемой СКЭС (рис. 2), когда антенна синхронизатора 1 размещена соосно с круглой апертурой САФАР диаметром  $d_{\Sigma}$ , максимальная разность фазового набега в пространстве будет на участке  $\Delta R_m = R_k - R_0$ , где  $R_0$  и  $R_k$  — расстояния от синхронизатора до центров центрального и крайнего единичных активных модулей САФАР.

Эффективная и надежная работа СКЭС возможна тогда, когда стабильность частоты синхросигнала позволяет станции выполнять заданные (требуемые) тактико-технические характеристики и параметры. Для этого необходимо, чтобы относительная нестабильность частоты синхросигнала не превышала установленного допустимого уровня. Поскольку САФАР вследствие компоновки характеризуется равенством площадей СБ и апертуры АФАР, то это приводит к непосредственной взаимосвязи ее конструктивных и энергетических параметров и характеристик, что в совокупности с антенной системой синхронизатора определяет допустимый уровень относительной нестабильности частоты синхронизатора  $\delta_{f_{\text{доп}}} = \Delta f_{\text{сдоп}} / f_c$ , где  $\Delta f_{\text{сдоп}}$  — допустимое абсолютное изменение частоты синхросигнала;  $f_c$  — частота синхросигнала.

В работе [6] предложены два варианта построения антенной системы синхронизатора ча-

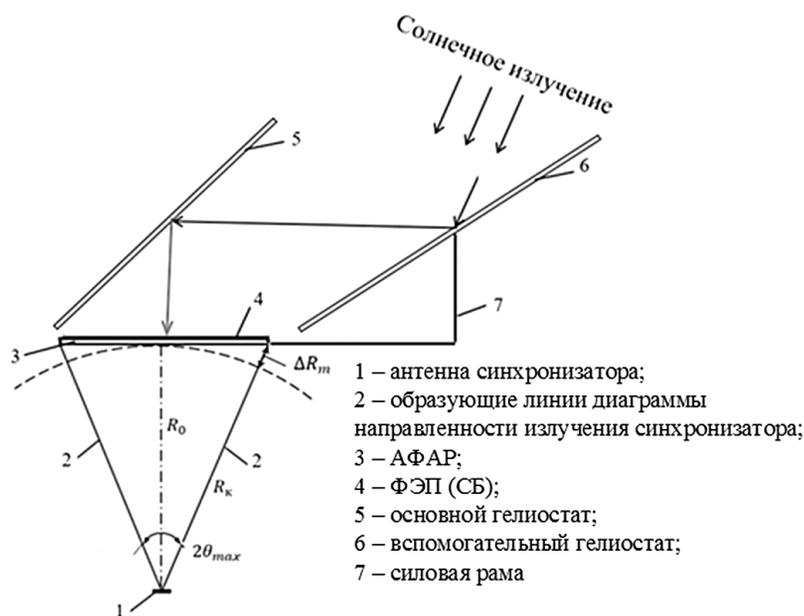


Рис. 2. Элементы СКЭС

стоты, обеспечивающие необходимые условия для функционирования САФАР.

Первый вариант реализуется при угловом размере полотна АФАР  $2\theta_{\max} = \lambda_c / d_c > 1$ , где  $\lambda_c$  — длина волны синхросигнала;  $d_c$  — диаметр антенны синхронизатора.

Диаграмму направленности антенны синхронизатора формируют таким образом, чтобы создать одинаковые условия для всех синхронизируемых АГ, коэффициент усиления которых остается неизменным.

Во втором варианте, реализуемом при угле  $2\theta_{\max} = \lambda_c / d_c < 1$ , используется круглая апертурная антенна, которая обеспечивает равенство коэффициента усиления АГ на краю АФАР коэффициенту усиления АФАР первого варианта. Это приводит к расширению полосы синхронизации АГ к центру полотна АФАР и уменьшению коэффициента усиления.

Мощность СВЧ колебаний  $P_\Sigma$  при прочих одинаковых условиях напрямую зависит от площади всех фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии, и равна

$$P_\Sigma = 0,25\pi\eta_M E_c d_z^2, \quad (1)$$

где  $E_c$  — солнечная постоянная (для геостационарной орбиты (ГСО) — 1360 Вт/м<sup>2</sup>);

$\eta_M$  — КПД активного модуля САФАР,  
 $\eta_M = \eta_{гс} \eta_{с.б} \eta_{гис}$ .

Здесь  $\eta_{гс} \eta_{с.б} \eta_{гис}$  — КПД гелиостата, ансамбля ФЭП, генераторно-излучающей системы соответственно [7]. Для представления возможностей рассматриваемой САФАР, базирующейся на носителях, размещенных на геостационарной орбите, на рис. 3 представлены зависимости излучаемой мощности САФАР от необходимого для этого диаметра полотна антенны.

Физические величины, используемые в формуле (1) и в последующем, имеют значения:  $\eta_{гс} = 0,85$ ;  $\eta_{гис} = 0,6$ ;  $\eta_{с.б} = 0,2$  и  $0,3$ .

Для отмеченных вариантов построения антенной системы синхронизатора в соответствии с [6, 8] расстояние  $R_0$  составляет

$$R_0 = 0,5d_z \operatorname{ctg}(0,5\lambda_c / d_c), \quad (2)$$

а мощность  $P_{\Sigma}$  и величина  $\delta_{\text{длоп}}$  в зависимости от варианта построения системы будут:

– для первого варианта

$$P_{\Sigma} = \frac{8P_\Sigma [1 - \cos^3(0,5\lambda_c / d_c)] \cos(0,5\lambda_c / d_c)}{3k_{c1} \sin^2(\lambda_c / d_c)}; \quad (3)$$

$$\delta_{\text{длоп}} = \Delta\varphi_{\text{длоп}} \left\{ \frac{\pi [1 - \cos(0,5\lambda_c / d_c)] d_\Sigma}{\sin(\lambda_c / d_c) \lambda_c} + \right\}^{-1}; \quad (4)$$

$$+ 0,4k_f k_{c1}^{0,5} / (1 - A_c)$$

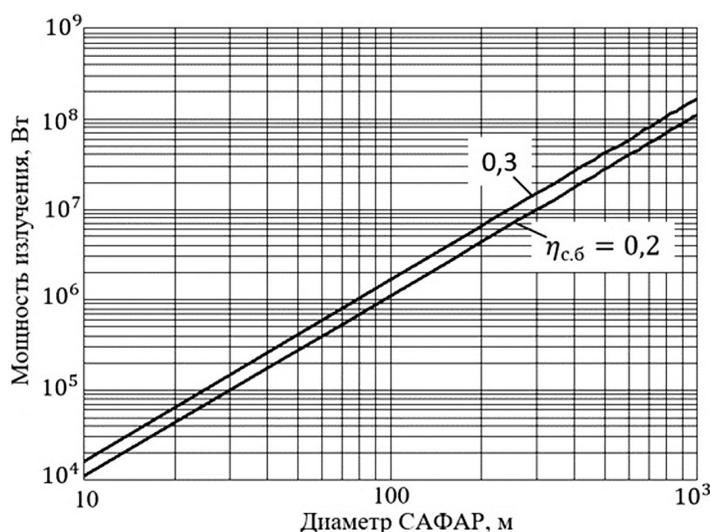


Рис. 3. Зависимость мощности излучения САФАР от диаметра антенны

– для второго варианта

$$P_{c\Sigma} = \frac{2P_{\Sigma}}{k_{c1}} \left[ \frac{\lambda_c / d_c}{\sin(\lambda_c / d_c)} \right]^2; \quad (5)$$

$$\delta_{f_{доп}} = \Delta\Phi_{сдоп} \left\{ \frac{2\pi [\sec(0,5\lambda_c / d_c) - 1] d_c d_{\Sigma} / \lambda_c^2 +}{+0,4k_f k_{c1}^{0,5} / (1 - A_c)} \right\}^{-1} \quad (6)$$

Здесь  $\Delta\Phi_{сдоп}$  — допустимый уровень несинфазности возбуждения активных модулей;  $k_f = k_{c1} / F_{0,2}$ , где  $F_{0,2}$  — коэффициент затягивания частоты активного модуля АГ;  $k_{c1}$  — коэффициент усиления АГ;  $A_c = \Delta f_{с,r1} / \Delta f_{с,r1доп}$  — отношение расстройки резонансной частоты АГ относительно частоты  $f_c$  к допустимому значению при вариации величины  $\Delta f_{с,r1}$  в пределах от 0 до  $\Delta f_{с,r1доп}$ .

Далее приведены результаты расчетов рассмотренных вариантов построения антенной системы синхронизатора частоты для СКЭС с САФАР, размещенной на геостационарном носителе, при следующих входящих в формулы (2) – (6) численных значениях величин: рабочая частота станции  $f_c = 2450$  МГц ( $\lambda_c = 0,122$  м);  $k_f = 30$  и 40;  $\Delta\Phi_{сдоп} = \pi/8$ ;  $\eta_{с.б} = 0,2$ ;  $k_{c1} = 25$  дБ и 30 дБ;  $A_c = 0$  и 0,75; диаметр  $d_c = 0,5\lambda_c$  (для первого варианта табл. 1),  $d_c = 2\lambda_c$  (для второго варианта табл. 2). При расчете мощности излучения  $P_{\Sigma}$  использовалась формула (1) при принятых численных значениях величин, использованных для расчета зависимостей на рис. 3.

## Выводы

Результаты расчетов показали возможность практической реализуемости обоих вариантов построения антенной системы синхронизатора частоты для СКЭС с САФАР.

САФАР по своим потенциальным возможностям и выходным параметрам может быть использована для решения задач потребителей в системах лучевой энергетики, в информационных каналах и системах специального назначения на Земле (море), в космосе и воздушном пространстве.

Требования по повышению стабильности частоты синхросигнала при прочих одинаковых условиях возрастают с увеличением диаметра апертуры САФАР, повышением коэффициента усиления синхронизируемого автогенератора и уменьшением его коэффициента затягивания частоты.

Представленные расчеты подтверждают, что более высокие требования к стабильности частоты предъявляются при первом варианте построения СКЭС, определяемые меньшим расстоянием от антенной системы синхронизатора до САФАР. С повышением эффективности фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии (при неизменном диаметре САФАР) и увеличением мощности излучения и синхронизации, требования к стабильности частоты при остальных одинаковых условиях остаются неизменными.

Таблица 1

Показатели САФАР при  $d_c = 0,5\lambda_c$ ,  $\eta_{c,0} = 0,2$

$d_{\Sigma}, \text{ м}$	$P_{\Sigma}, \text{ МВт}$	$R_0, \text{ м}$	$P_{\Sigma\Sigma}, \text{ кВт}$		$\delta_{f,c}$ при $A_c = 0$				$\delta_{f,c}$ при $A_c = 0,75$			
					$k_f = 30$		$k_f = 40$		$k_f = 30$		$k_f = 40$	
					$k_{c1} = 25 \text{ дБ}$	$k_{c1} = 30 \text{ дБ}$	$k_{c1} = 25 \text{ дБ}$	$k_{c1} = 30 \text{ дБ}$	$k_{c1} = 25 \text{ дБ}$	$k_{c1} = 30 \text{ дБ}$	$k_{c1} = 25 \text{ дБ}$	$k_{c1} = 30 \text{ дБ}$
50	0,27	16,1	1,25	0,4	3,6·10 <sup>-4</sup>	2,8·10 <sup>-4</sup>	4·10 <sup>-4</sup>	3,2·10 <sup>-4</sup>	2,5·10 <sup>-4</sup>	1,8·10 <sup>-4</sup>	2·10 <sup>-4</sup>	1,7·10 <sup>-4</sup>
200	4,3	64,3	20	6,3	1,3·10 <sup>-4</sup>	1,2·10 <sup>-4</sup>	1,3·10 <sup>-4</sup>	1,2·10 <sup>-4</sup>	1,1·10 <sup>-4</sup>	9·10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-4</sup>	9·10 <sup>-5</sup>
400	17,2	128,6	80	25,2	6,7·10 <sup>-5</sup>	6,5·10 <sup>-5</sup>	6,6·10 <sup>-5</sup>	6,4·10 <sup>-5</sup>	6·10 <sup>-5</sup>	5,5·10 <sup>-5</sup>	5,8·10 <sup>-5</sup>	5,4·10 <sup>-5</sup>

Таблица 2

Показатели САФАР при  $d_c = 2\lambda_c$ ,  $\eta_{c,0} = 0,2$

$d_{\Sigma}, \text{ м}$	$P_{\Sigma}, \text{ МВт}$	$R_0, \text{ м}$	$P_{\Sigma\Sigma}, \text{ кВт}$		$\delta_{f,c}$ при $A_c = 0$				$\delta_{f,c}$ при $A_c = 0,75$			
					$k_f = 30$		$k_f = 40$		$k_f = 30$		$k_f = 40$	
					$k_{c1} = 25 \text{ дБ}$	$k_{c1} = 30 \text{ дБ}$	$k_{c1} = 25 \text{ дБ}$	$k_{c1} = 30 \text{ дБ}$	$k_{c1} = 25 \text{ дБ}$	$k_{c1} = 30 \text{ дБ}$	$k_{c1} = 25 \text{ дБ}$	$k_{c1} = 30 \text{ дБ}$
50	0,27	98	1,87	0,6	1,1·10 <sup>-3</sup>	8,9·10 <sup>-4</sup>	3·10 <sup>-4</sup>	5,9·10 <sup>-4</sup>	3,9·10 <sup>-4</sup>	2,3·10 <sup>-4</sup>	3·10 <sup>-4</sup>	1,8·10 <sup>-4</sup>
200	4,3	392	29,7	9,4	4,7·10 <sup>-4</sup>	3,9·10 <sup>-4</sup>	4,3·10 <sup>-4</sup>	3,4·10 <sup>-4</sup>	2,7·10 <sup>-4</sup>	1,8·10 <sup>-4</sup>	2,2·10 <sup>-4</sup>	1,5·10 <sup>-4</sup>
400	17,2	784	118	37,5	2,7·10 <sup>-4</sup>	2,4·10 <sup>-4</sup>	2,6·10 <sup>-4</sup>	2,2·10 <sup>-4</sup>	1,9·10 <sup>-4</sup>	1,4·10 <sup>-4</sup>	1,6·10 <sup>-4</sup>	1,2·10 <sup>-4</sup>

Литература

1. Грилихес В.А. Космические солнечные энергостанции. — Л.: Наука. 1986. 182 с.
2. Арджанов А.С., Грилихес В.А., Мироненко И.Г., Павский В.Ф., Рыжкова Л.В., Торохов Б.В. Комбинированные полупроводниковые системы для прямого преобразования солнечной энергии в СВЧ излучение. Тезисы докладов международного симпозиума по солнечной энергетике. — Алушта. 22–26 апреля 1991. — М.: ЭНИН. 1991. 326 с.
3. Грилихес В.А., Павский В.Ф. Полупроводниковые системы для преобразования солнечной энергии в управляемое СВЧ излучение космических энергостанций. XIII международный симпозиум по истории авиации и космонавтики. Тезисы докладов. — Москва: ИИЭТ РАН. 2001. С. 176–179.
4. Грилихес В.А., Добров В.А., Павский В.Ф. Система преобразования солнечной энергии в управляемое СВЧ излучение для космических энергостанций, передающих энергию на Землю. Международная конференция «Возобновляемая энергетика: состояние, проблемы, перспективы». Сборник докладов. — Санкт-Петербург. 4–6 ноября 2003 г. С. 208–211.
5. Баркова М.Е. Современные методы получения энергии // Науки о Земле: вчера, сегодня, завтра: материалы междунар. науч. конф. (г. Казань, май 2015 г.). — Казань: Бук. 2015. С. 104–123.
6. Бакурский К.В., Мысливцев Т.О., Невзоров В.И., Павский В.Ф. Особенности частотной синхронизации крупногабаритной активной фазированной антенной решетки космического базирования // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2018. Вып. 661. С. 130–136.
7. Бакурский К.В., Никифоров С.В., Павский В.Ф., Радионов Н.В., Стеганов Г.Б. Фотоэлектрическая солнечная космическая энергостанция с пространственной синхронизацией частоты // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2018. Вып. 665. С. 132–141.
8. Мысливцев Т.О., Невзоров В.И., Павский В.Ф. Допустимый уровень неустойчивости частоты при пространственной частотной синхронизации крупногабаритных космиче-

ских АФАР // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2019. Вып. 668. С. 97–102.

References

1. Grilikhes V.A. Space solar power stations. — L.: Nauka. 1986. 182 p.
2. Arjanov A.S., Grilikhes V.A., Mironenko I.G., Pavsky V.F., Ryzhkova L.V., Torokhov B.V. Combined semiconductor systems for direct conversion of solar energy into microwave radiation. Abstracts of the reports of the International Symposium on solar energy. — Alushta. April 22–26, 1991. — M. ENIN. 1991. 329 p.
3. Grilikhes V.A., Pavsky V.F. Semiconductor systems for converting solar energy into controlled microwave radiation of space power stations. XIII International Symposium on the History of Aviation and Cosmonautics. Abstracts of reports. — Moscow. IET RAS. 2001. P. 176–179.
4. Grilikhes V.A., Dobrov V.A., Pavsky V.F. A system for converting solar energy into controlled microwave radiation for space power stations transmitting energy to the Earth. International Conference «Renewable Energy: state, problems, prospects». Collection of reports. — St. Petersburg: November 4–6, 2003. P. 208–211.
5. Barkova M.E. Modern methods of obtaining energy // Earth Sciences: yesterday, today, tomorrow: materials of the International Scientific Conference (Kazan, May 2015). — Kazan: Buk. 2015. P. 104–123.
6. Bakursky K.V., Myslivtsev T.O., Nevzorov V.I., Pavsky V.F. Features of frequency synchronization of a large-sized active phased array of a space-based antenna // The works of the Military space Academy named after A.F. Mozhaisky. 2018. Vol. 661. P. 130–136.
7. Bakursky K.V., Nikiforov S.V., Pavsky V.F., Radionov N.V., Stepanov G.B. Photovoltaic solar space power station with a spatial synchronization of frequency // proceedings of the Military space Academy named after A.F. Mozhaisky. 2018. Vol. 665. P. 132–141.
8. Myslivecek T.A., Nevzorov V.I., Pavsky V.F. Allowable level of frequency instability in spatial frequency synchronization of large space AFAR // proceedings of the Military space Academy named after A.F. Mozhaisky. 2019. Vol. 668. P. 97–102.