

ТЕОРИЯ И ТЕХНИКА АНТЕНН И МИКРОВОЛНОВЫХ УСТРОЙСТВ

УДК 621.396.67:621.314.6

*А.В. ГОМОЗОВ, канд. техн. наук, В.И. ГОМОЗОВ, д-р техн. наук,
В.М.ШОКАЛО, д-р техн. наук, Д.В. ГРЕЦКИХ, канд. техн. наук, Ш.Ф.А. АЛЬ-САМАРАЙ*

ПЕРЕДАЮЩАЯ ПОДСИСТЕМА БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ К ТРУДНОДОСТУПНЫМ ОБЪЕКТАМ НА ОСНОВЕ МНОГОПОЗИЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ С ФОКУСИРОВКОЙ ИЗЛУЧЕНИЯ.

ЧАСТЬ 1

Введение

Передающая подсистема беспроводной передачи энергии (БПЭ) преобразует энергию первичного источника в направленное излучение, которое приемной подсистемой преобразуется в постоянный ток, поступающий к потребителю.

Еще на начальном этапе становления электротехники идею БПЭ в США высказал Н. Тесла, получив в 1891 г. патент на изобретение "БПЭ (эффект Тесла)". Система БПЭ малой дальности при использовании переменного тока низкой частоты носителем излучаемой энергии по этому патенту была реализована при создании освещения Всемирной выставки в г. Чикаго 1 мая 1893 г. [1,2].

В начале 60-х годов XX века с созданием мощных генераторов сверхвысокой частоты (СВЧ) [3, 4 и др.] начался новый виток интереса к системам БПЭ. В первой половине XX века в СССР с учетом состояния и перспектив развития мощных СВЧ генераторов П.Л. Капица рассмотрел их применение при создании наземных систем БПЭ дальнего действия [5]. В Украине исследования по вопросам БПЭ начали проводиться в Киевском политехническом институте под руководством С.И. Тетельбаума [2]. Теоретические и экспериментальные исследования с переменным успехом продолжаются по настоящее время в экономически развитых странах мира: США, Канаде, Франции, СССР, Великобритании, Японии, России и др. [2, 6–14]. Обусловлено это тем, что развитие промышленности и индустриализация сельского хозяйства приводят к существенному увеличению потребления основных земных источников энергии и обостряют необходимость поиска альтернативных внеземных источников энергии. С последней четверти XX века главное внимание уделялось возможностям создания ректенн с размерами до 10×13 км и крупномасштабных мощных солнечных космических электростанций с дальностями передачи и приема СВЧ энергии до $4 \cdot 10^3$ км [2,15,16].

Среднемасштабные натурные демонстрационные эксперименты с поверхности Земли на летательные аппараты и между наземными объектами показали осуществимость систем БПЭ малой дальности. Для создания мощных солнечных космических электростанций необходимы крупномасштабные демонстрационные эксперименты по приему солнечной энергии и ее преобразованию в постоянный ток и энергию СВЧ излучения в крупноапертурных ректеннах космического базирования. Для подготовки и проведения таких экспериментов по оценке специалистов требовались бы десятки лет и сотни миллиардов долларов [2, 15, 16 и др.].

Однако выявилась принципиальная возможность создания систем БПЭ между наземными объектами на дальностях прямой видимости. Это достаточно для наземных систем БПЭ к труднодоступным объектам. К ним могут относиться объекты, размещаемые высоко в горах, на островах морей и крупных озер, а также в других местах, к которым по техническим, экономическим и другим причинам создание воздушных, надводных, подземных и подводных линий передачи электроэнергии невозможно или нецелесообразно.

Для таких систем БПЭ в известных работах не рассматривались целесообразные принципы работы, структуры излучаемых сигналов, варианты построения, обеспечение биологической безопасности операторов и населения, возможная производительность. Целью данной статьи является устранение этих пробелов.

Целесообразность применения многопозиционной системы излучателей с фокусировкой одноступенчатых дискретных V-образных многочастотных импульсов

Для сокращения сеансов работы подсистем БПЭ нужны высокие энергетические характеристики электромагнитных излучений (ЭМИ). Это можно реализовать в многопозиционной системе излучателей (МСИ) с фокусировкой ЭМИ [17 - 20]. За последние два десятилетия опубликованы разработанные методы фокусировки ЭМИ с комбинированными способами управления сигналами излучателей вдоль апертур МСИ, плоских и выпуклых фазированных антенных решеток (ФАР). Эти методы имеют достоинства и недостатки. Рациональное сочетание их достоинств выявило новые возможности создания радиоэлектронных средств (РЭС) радиолокации и радиосвязи ближнего действия, скрытой связи между объектами в локальных областях пространства, средств функционального подавления и поражения (ФПП) РЭС радиолокации и радиосвязи, систем БПЭ и, в частности, систем БПЭ лучом СВЧ к труднодоступным объектам, размещаемых высоко в горах, на островах морей и крупных озерах.

Обобщение и классификация с единых позиций методов фокусировки ЭМИ, рассматриваемых до этого разными авторами в силу объективных и субъективных причин независимо друг от друга, впервые были предприняты в 1985–1987 гг. с учетом принципов функционирования по используемым степеням свободы при управлении параметрами сигналов излучателей МСИ и ФАР [21, 22]. Известные в данное время методы фокусировки ЭМИ в монографии [23] предложено, как и ранее, классифицировать по используемым *многомерным* степеням свободы при управлении параметрами сигналов излучателей МСИ и ФАР. При этом известные методы фокусировки ЭМИ классифицируются на основе следующих *видов управлений*: *двухстепенных* пространственных временного (ПВ), фазового (ПФ) и частотного (ПЧ); *многостепенных взаимосогласованных* пространственных фазово-временного (ПФВ), частотно-временного (ПЧВ), фазово-частотного (ПФЧ), амплитудно-временного (ПАВ), амплитудно-фазового (ПАФ), амплитудно-частотного (ПАЧ), амплитудно-фазово-частотного (ПАФЧ), амплитудно-фазово-временного (ПАФВ), амплитудно-частотно-временного (ПАЧВ), фазово-частотно-временного (ПФЧВ), амплитудно-фазово-частотно-временного (ПАФЧВ).

Системы БПЭ к труднодоступным объектам должны обладать, наряду с высокими энергетическими характеристиками и производительностью, простотой реализации. В них заранее известны положения и центральные рабочие частоты передающей и приемной подсистем. Поэтому для снижения энергетических и временных потерь в них не должно быть сканирования СВЧ излучения. Компромиссное и наиболее эффективное решение этих требований возможно при использовании в их передающих подсистемах МСИ с ПФЧ фокусировкой одноступенчатых дискретных (ОСД) V-образных многочастотных (МЧ) радиоимпульсов [23, 24]. Такие МСИ создают большую спектральную плотность в максимумах ЭМИ без сканирования при обеспечении требуемых временных параметров пачек сфокусированных импульсов.

Энергетические и временные характеристики МСИ с фокусировкой ОСД V-образных МЧ импульсов

В МСИ с фокусировкой ОСД V-образных МЧ сигналов за счет увеличения числа излучателей и снижения их мощностей можно обеспечить повышение общей мощности передающей подсистемы БПЭ и улучшение решения задачи биологической защиты операторов и местного населения на заданной дальности от МСИ. Система координат и положение излучателей в круге с радиусом r_M , равным полбазы МСИ ($0,5L_{Y,Z} = r_M$, где $L_{Y,Z}$ – база апертуры МСИ по осям OX и OZ соответственно), с фокусировкой ЭМИ в точке $P_F(x_F, y_F, z_F)$ приведены на рис. 1.

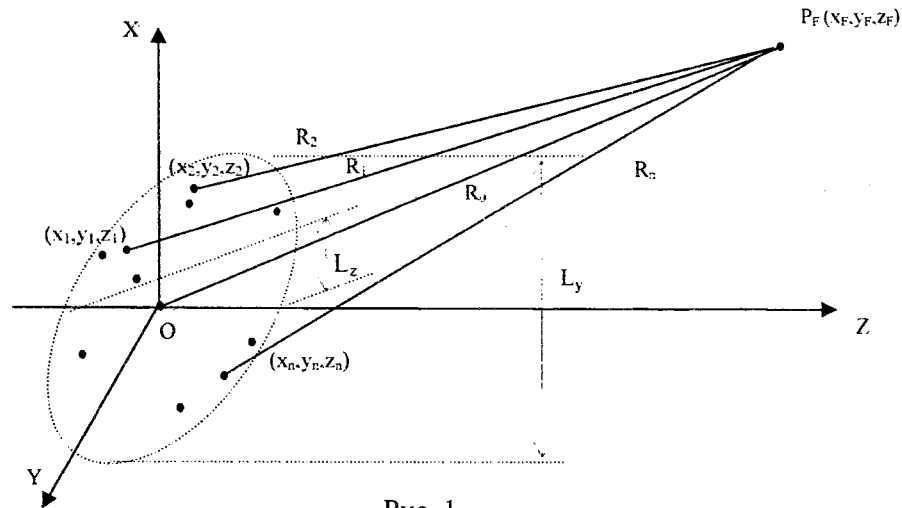


Рис. 1

Для указанных выше условий и типа МСИ можно записать [18 – 20, 23]:

$$E_{(2)}^{P,1}(x, y, z, t) = \left\{ \sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} \frac{\sqrt{60 P_n G_n}}{R_n} \exp \left\{ -j \left[2\pi f_{0n(2)}^{P,1} \left(t - \frac{R_n}{c} \right) + \varphi_{0n(2)}^{P,1} \right] \right\} \right\}; \quad (1)$$

$$S_{(2)}^{P,1}(x, y, z, t) = \left\{ \sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} \sqrt{\frac{P_n G_n}{4\pi R_n^2}} \exp \left\{ -j \left[2\pi f_{0n(2)}^{P,1} \left(t - \frac{R_n}{c} \right) + \varphi_{0n(2)}^{P,1} \right] \right\} \right\}^2, \quad (2)$$

где соответственно $E_{(2)}^{P,1}(x, y, z, t)$ и $S_{(2)}^{P,1}(x, y, z, t)$ – напряженность и спектральная плотность потока мощности ЭМИ в момент времени t ; N – количество излучателей в МСИ; P_n и G_n – мощность и коэффициент усиления n -го излучателя; $R_n = [(x-x_n)^2 + (y-y_n)^2 + (z-z_n)^2]^{1/2}$ – расстояние до точки наблюдения от n -го излучателя; c – скорость света; $f_{0n(2)}^{P,1}$ и $\varphi_{0n(2)}^{P,1}$ – начальные частоты и фазы n -го излучателя. При этом индексы в обозначениях параметров формул (1) и (2) означают следующее: нижний индекс "2" – фокусируются V-образные МЧ радиоимпульсы; верхний индекс "P" – фокусировка осуществляется разнесенной МСИ; верхний индекс "1" – осуществляется внутриволновое воздействие на приемную подсистему БПЭ.

Распределение начальных частот источников излучения в МСИ с фокусировкой ОСД V-образных МЧ сигналов при небольшом числе источников излучения можно записать в упрощенном виде [23, 24]:

$$f_{0n(2)}^{P,1} = f_0 + |n| \Delta F_n, \quad (3)$$

где $n \in \left[-\frac{N-1}{2}, \dots, 0; 0, \dots, \frac{N-1}{2} \right]$.

При этом же условии распределение начальных фаз излучателей для когерентного сложения электромагнитных полей (ЭМП) в точке фокусировки также можно записать в упрощенном виде [23, 24]:

$$\varphi_{0n(2)}^{P,1} = -2\pi f_{0n(2)}^{P,1} \left(\frac{z_F}{c} - \frac{R_{Fn}}{c} \right), \quad (4)$$

где $R_{Fn} = [(x_F-x_n)^2 + (y_F-y_n)^2 + (z_F-z_n)^2]^{1/2}$ – расстояние между точкой фокусировки и центром n -го излучателя с координатами $P_F(x_F, y_F, z_F)$ и (x_n, y_n, z_n) .

Без ущерба для основных закономерностей расчеты по (1) – (4) в [19, 23] выполнены для МСИ при следующих параметрах: $N=33$, $P_n=10$ кВт, $P_{изл}=P_n N=330$ кВт и $L_{y,z}=2r_M=10^3$ м, где $P_{изл}$ – мощность излучения МСИ.

Полученные при этом распределения начальных частот и фаз по апертуре МСИ с такими параметрами для случая равномерного размещения ее излучателей по оси Ox , рассчитанные по соотношениям (3) и (4), приведены на рис. 2 и 3.

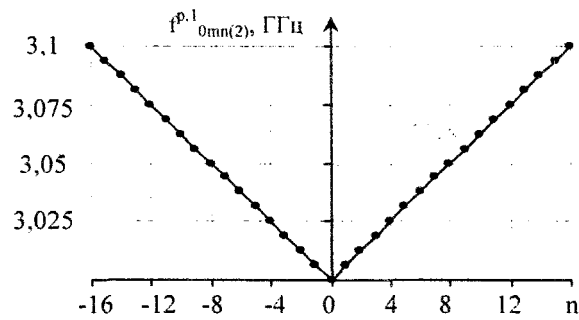


Рис. 2

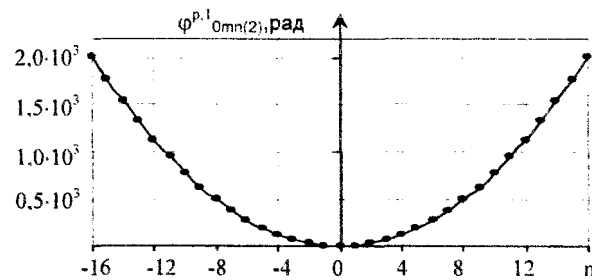


Рис.3

При расчетах сфокусированных ЭМИ введены приведенные координаты: $x^M=x/L_x$, $y^M=y/L_y$ и $z^M=z/L_z$. Результаты расчетов $S^{p,1}_{(2)}$ по (2) при принятых исходных параметрах МСИ в точках $z^M=14$ и 24 приведены на рис. 4 и 5 [23, 26].

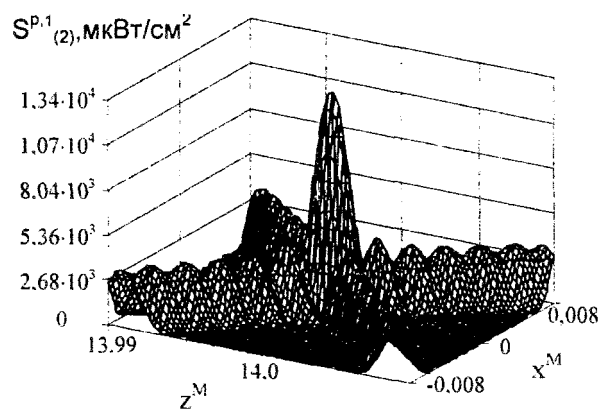


Рис.4

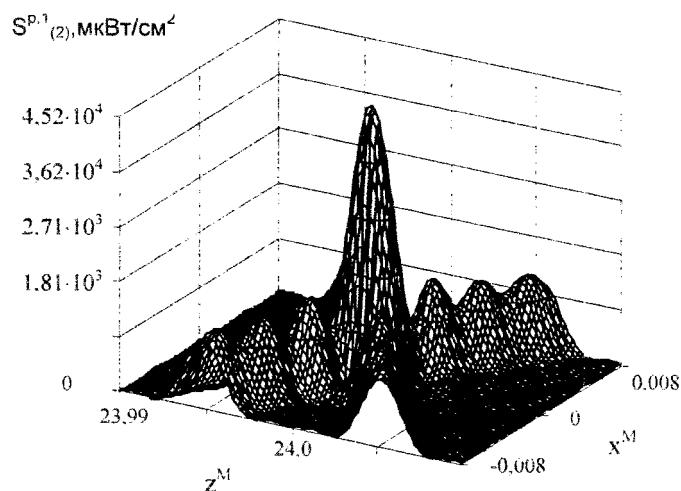


Рис.5

Распределения нормированных значений плотности потока мощности излучения ЭМИ $S_{H(2)}$ по оси OZ (где $S_{H(2)} = S^{p.1}_{(2)} / S^{p.1}_{(2) \max}$) в МСИ для аналогичных условий в окрестности точек $z_F^M=4$, $z_F^M=14$ и $z_F^M=24$ приведены на рис. 6 – 8.

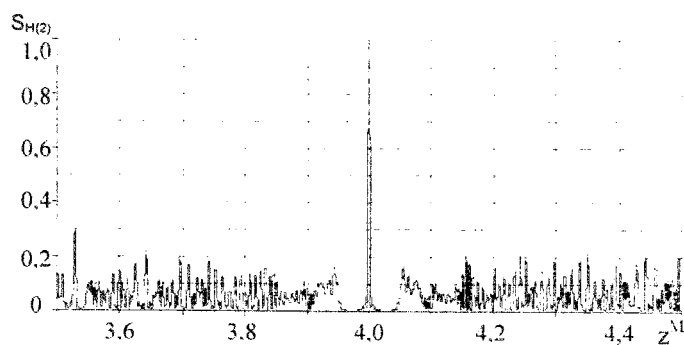


Рис. 6

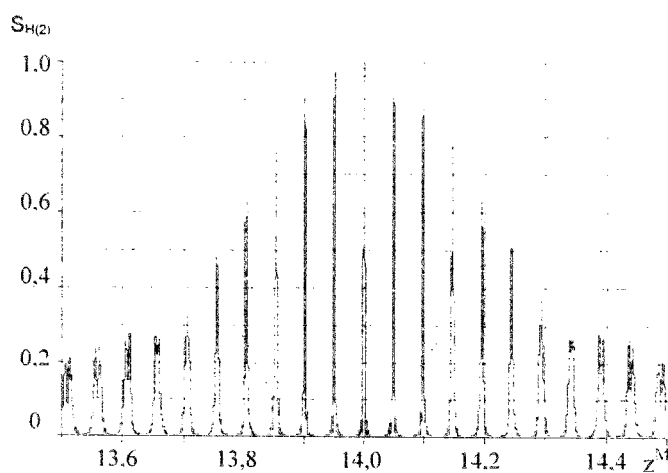


Рис. 7

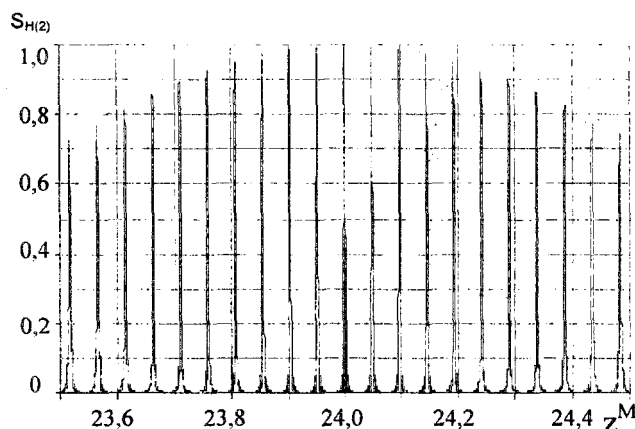


Рис. 8

Анализ результатов подробного моделирования, полученных в [23–26] и в качестве характерных примеров, представленных на рис. 6–8, показывает, что при выборе точки фокусировки на дальности $z_F^M \leq 4$ и использовании в МСИ ПФЧ фокусировки ОСД V-образных МЧ сигналов с распределениями их частот и фаз вида (3) и (4) формируется только одиночный ПВИ (рис. 6) так же, как и в плоской ФАР [25], без углового сканирования.

Сравнительно большие получаемые в этом случае боковые лепестки в окрестности центрального пика при его расположении на расстоянии до $z_F^M = 4$ могут существенно уменьшаться за счет увеличения числа излучателей в МСИ до $N \geq 00 \dots 300$ [23, 25].

С увеличением дальности до точки фокусировки в пространстве создается последовательность ПВИ (рис. 7 и 8), длительность, период следования и скважность которых равны $T_{ПВИ(2)} \approx 1/\Delta F_{\max}$, $T_{ПВИ(2)} = 1/\Delta F_n$, $Q_{ПВИ(2)} = T_{ПВИ(2)}/\tau_{ПВИ(2)}$ и $Q_{ПВИ(2)} = \Delta F_{\max}/\Delta F_n$, а число сфокусированных импульсов в периодических последовательностях растет с увеличением z_F .

В [23–26] вариационным способом получено эмпирическое выражение для определения требуемого количества k сфокусированных ПВИ в МСИ с фокусировкой ОСД V-образных МЧ сигналов:

$$[kcQ_{ПВИ(2)}/\Delta F_{\max(2)}] \leq [K_{qF(2)}^2 \lambda z_F^2 / K_{Иа(2)} (2r_M)^2], \quad (5)$$

где k – число импульсов в последовательности ПВИ; $q=2$ -индекс, указывающий на использование V-образных МЧ сигналов; $K_{1F(2)}=3,5 \dots 1,2$ -коэффициенты расширения по времени и линейной протяженности ПВИ, если $z_F^M=2 \dots 4$, или $K_{2F(2)}=1$, если $z_F^M \geq 5$; $K_{Иа(2)} \approx 0,8$ -коэффициент использования эквивалентной геометрической площади апертуры МСИ.

Выше приведены историческая справка и результаты теоретического анализа целесообразности создания передающих подсистем БПЭ к труднодоступным объектам на основе МСИ с фокусировкой ОСД V-образных МЧ сигналов.

Возможности реализации таких систем БПЭ излагаются в последующей части 2 данной статьи.

Список литературы: 1. *Никола Тесла* // 100 человек, которые изменили ход истории. – М. : ООО « Де Агостини», 2009. – Вып. № 93. 31 с. 2. *Шокало В.М., Лучанинов А.И., Рыбалко А.М., Грецих Д.В.* Крупноапертурные антенны - выпрямители систем БПЭ микроволновым лучом – Харьков : Коллегиум, 2006. – 308 с. 3. *Вотт Н.А.* Магнетроны с длинным анодом // Электронные СВЧ приборы со скрещенными полями / под общей ред. М.М. Федорова. – М. : ИИЛ, 1961. – Т. 2.–С. 236–248. 4. *Гарбер И.С., Давыдов С.Д., Ерган А.И., Колтаков Н.Д.* Проектирование радиолокационных передатчиков / под ред. А.И. Ергана. – Харьков : АРТА СА им. Говорова Л.А., 1961. – 278 с. 5. *Катица П.Л.* Эксперимент. Теория. Практика. – М. : Наука, 1977. – 352 с. 6. *Brown W.C.* Experimental involving a microwave beam to power and position a helicopter // IEEE Trans. V. AES-5. – 1969. – № 9. – 692 p. 7. *Гриликес В.А.* Солнечные космические электростанции. – Л. : Наука, 1977. – 186 с. 8. *Нейлос Э. Дж.* Новые разработки в области направленной передачи электромагнитной энергии // ТИИЭИР. – 1978. – Т.66,

№ 3. – С. 5-22. 9. *Gutmann R.J., Borrego J.M.* Power combining in an array of microwave power rectifiers // IRE Trans. on Microwave Theory and Techniques. – 1979. – V. МТТ–27. № 12. – P. 958–968. 10. *Ремезов Б.А., Классен В.И., Шишилов А.В.* Выпрямительные антенны // Зарубежная радиоэлектроника. – 1980. – №5. – С. 79-89. 11. *Brown W.C.* The history of power transmission by radio waves // IEEE Trans. – 1984. – V. МТТ–32. № 9. – P. 1230–1242. 12. *Егоров А.Н., Калмыков А.И.* и др. Экспериментальное исследование эффективности элементов антенны-выпрямителя (ректенны) // Радиотехника и электроника. – 1983. – №3. – С. 613-615. 13. *Книжник Р.С., Кочубей А.Н.* Передача энергии пучком СВЧ радиоволн и солнечные космические электростанции // Зарубежная радиоэлектроника. – 1983. – № 7. – С. 75-84. 14. *Егоров А.Н.* Об эффективности передачи энергии электромагнитным пучком и преобразования ее в ректенне // Радиотехника и радиоэлектроника. – 1985. – №. 4. –С. 805–811. 15. *Шифрин Я.С., Шокало В.М., Лучанинов А.И.* и др. Исследования по беспроводной передаче энергии в Харьковском национальном университете радиоэлектроники // Сб. науч. трудов по материалам 1-го Междунар. радиоэлектронного Форума "Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития", МРФ-2002, Ч.1. – Харьков : ХНУРЭ, АН ПРЭ, 2002. – С. 236-239. 16. *Ванке В.А., Лопухин В.М., Саввин В.Л.* Проблемы солнечных космических электростанций // Успехи физических наук. – 1977. – Т. 123, вып. 4. –С. 633–657. 17. *Александров В.А., Бабков Ю.П., Гомозов А.В.* и др. Формирование мощных радиоимпульсов в заданном объеме пространства при совместной работе нескольких РЛС для ФПП РЭС // Сб. науч. тр. – Харьков : ВИРТА ПВО, 1992. – Вып. 31. – С. 180–191. 18. *Гомозов В.И., Гомозов А.В., Титов С.В.* ПФЧ фокусировка сигналов в плоских ФАР при V-образной дискретизации частот // Радиотехника : Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2001. – Вып. 122. – С. 201-207. 19. *Гомозов В.И., Гомозов А.В., Титов С.В.* Фокусировка ЭМИ на основе ПФЧВ управления сигналами в ФАР и разнесенных системах излучателей // Сб. науч. трудов по материалам 1-го Междунар. радиоэлектронного Форума "Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития". МРФ-2002 (8-10 октября 2002 г.). Ч.2. – Харьков : ХНУРЭ, 2002. – С. 435-438. 20. *Гомозов В.И., Гомозов А.В., Титов С.В.* ПАФЧ фокусировка излучения при многоступенчатом V-образном распределении частот по апертурам МСИ // Прикладная радиоэлектроника. – Харьков : АН ПРЭ, ХНУРЭ. – 2006. – Т. 5, № 4 – С. 477-480. 21. *Gomozov V.I.* Spatial–Frequency–Phase–Time Modulation of radio Pulses in transmitting PPA // Тез. докл. Междунар. конф. "Теория и техника антенн " (МКТТА–95), г. Харьков, Украина, ноябрь, 1995. 22. *Gomozov V.I.* Technology of Mikrowave Radiation Focusing // 6-th International Symposium on Recent Advances in Microwave Technoogy (SRAMT-97). Beijing, China, A1-6, 1997. 23. *Гомозов А.В., Гомозов В.И., Ермаков Г.В., Титов С.В.* Фокусировка электромагнитного излучения и ее применение в радиоэлектронных средствах СВЧ / под ред. В.И. Гомозова.-Харьков : КП «Городская типография», 2011. – 330 с. 24. *Гомозов В.И., Гомозов А.В., Титов С.В.* и др. ПФЧ фокусировка сигналов в цилиндрических ФАР при V-образной дискретизации частот // Радиотехника : Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2002. – Вып. 127. – С. 42-49. 25. *Гомозов В.И., Гомозов А.В.* Новый метод фокусировки электромагнитных излучений // Антенны. – 2001. – № 3 (49). – С. 54-60. 26. *Гомозов В.И., Гомозов А.В., Титов С.В.* ПАФЧ фокусировка излучения при многоступенчатом V-образном распределении частот по апертурам МСИ // Прикладная радиоэлектроника. –Харьков : АН ПРЭ, ХНУРЭ, 2006. – Т. 5, № 4. – С. 477–480.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 14.03.2001