

УДК 621.396.67: 621.314.6

БЕСПРОВОДНАЯ ПЕРЕДАЧА ЭНЕРГИИ К ТРУДНОДОСТУПНЫМ ОБЪЕКТАМ НА ДАЛЬНОСТИ ПРЯМОЙ ВИДИМОСТИ НА ОСНОВЕ СФОКУСИРОВАННОЙ МНОГОПОЗИЦИОННОЙ АНТЕННОЙ СИСТЕМЫ

Ш.Ф.А. Аль-Самаран, Харьковский национальный университет радиоэлектроники

В статье проведен анализ принципов построения перспективных систем беспроводной передачи энергии (БПЭ) к труднодоступным объектам. Предложен усовершенствованный метод расчета конструктивных и электрических параметров для рассмотренных систем БПЭ, оценена возможность их технической реализации. Оценены основные характеристики предлагаемых систем БПЭ к труднодоступным наземным объектам с учетом направленных свойств излучателей многопозиционной антенной системы.

У статті проаналізовано принципи побудови перспективних систем БПЕ до важкодоступних об'єктів. Запропоновано вдоскопалений метод розрахунку конструктивних і електричних параметрів для розглянутих систем БПЕ, оцінено можливість їхньої технічної реалізації. Оцінені основні характеристики запропонованих систем БПЕ до важкодоступних об'єктів з урахуванням спрямованих властивостей випромінювачів багатопозиційної антенної системи.

The analysis of construction principles of perspective wireless power transmission (WPT) systems to remote objects is shown in the article. Improved method of calculation of structural and electric parameters for the suggested WPT systems is suggested and possibility of their technical realization is estimated. Main characteristics of the suggested WPT systems to remote objects taking into account directed properties of the of emitters of the multiposition antenna system.

Ключевые слова: беспроводная передача энергии, ректенна, приемно-выпрямительный элемент, многопозиционная система излучателей, труднодоступный объект, фокусировка электромагнитного излучения.

Введение

Предложенные для реализации в конце XX века системы БПЭ строились на основе использования передатчиков с однопозиционными крупноапертурными фазированными антенными решетками (ФАР) или зеркальными антеннами и применения «традиционной» пространственно-фазовой (ПФ) фокусировки микроволнового луча для получения более высокого КПД передачи энергии в системе БПЭ. Ректенна приемной подсистемы БПЭ при этом размещается в первой половине зоны Френеля, в точке осуществления фокусировки ЭМИ. Результаты исследования таких систем БПЭ до 2006 г. обобщены в [1]. ПФ методы фокусировки ЭМИ в зоне Френеля плоских ФАР и зеркальных антенн (ЗА) традиционно применяют для

измерения параметров их диаграмм направленности (ДН) на укороченных расстояниях. В плоских ФАР - за счет компенсации разностей ходов лучей от излучателей до точки наблюдения, в ЗА - за счет создания специального профиля зеркала или выноса облучателя вдоль фокальной оси [2].

При размещении в системе БПЭ ректенны в начале зоны Френеля, на расстояниях (0,01...0,02) от дальней границы зоны Френеля, за счет применения в передающей подсистеме БПЭ фокусировки ЭМИ, обеспечивается выигрыш в величине плотности потока мощности, по сравнению со случаем обычного синфазного излучения в зоне Френеля, на 37...27 дБ соответственно [2].

Таким образом, очевидны некоторые существенные недостатки рассмотренных известных публикациях систем БПЭ:

1. Для осуществления БПЭ на большие расстояния и достижения больших значений плотности потока мощности ЭМИ на ректенне, необходимо использование крупноапертурных ФАР. Это связано с зависимостью протяженности зоны Френеля от геометрических размеров ФАР, а фокусировку ЭМИ и размещение ректенны приемной подсистемы БПЭ необходимо осуществлять в первой половине зоны Френеля. Однако использование ФАР больших размеров нецелесообразно из-за сложности их технической реализации, большой стоимости и невозможности создания мобильных систем БПЭ при использовании таких ФАР.

2. Для достижения большого значения плотности потока мощности ЭМИ на ректенне, необходимо излучать сигнал большой мощности. Это приводит к увеличению расстояния до зоны биологической безопасности для населения и обслуживающего персонала вокруг передающей подсистемы БПЭ, что накладывает ограничения по ее размещению на местности.

3. При использовании традиционной ПФ фокусировки, протяженность сфокусированного импульса в точке фокусировки вдоль трассы распространения ЭМИ увеличивается с увеличением расстояния от передающей антенной системы [2]. Таким образом, большое значение плотности потока мощности ЭМИ будет не только на ректенне приемной подсистемы БПЭ, но и в ее окрестности, имеющей существенные геометрические размеры. Это не только увеличивает расстояние до зоны биологической безопасности вокруг приемной подсистемы БПЭ, но и может привести к функциональному подавлению (ФПД) или даже функциональному поражению (ФПР) приемных трактов и

других радиоэлектронных средств потребителей энергии, находящихся в этой области.

Для уменьшения этих недостатков и их частичного устранения, необходимо использовать многостепенные методы фокусировки, при которых, можно осуществлять фокусировку ЭМИ не только в зоне Френеля, но и в зоне Фраунгофера [2]. При этом можно получить сфокусированные пространственно-временные импульсы (ПВИ) с заданной протяженностью вдоль трассы распространения ЭМИ, не зависящей от расстояния до точки фокусировки [2], что позволит осуществлять фокусировку ЭМИ только в малой области пространства – непосредственно на ректенне. Кроме того, применение в передающей подсистеме сфокусированной многопозиционной антенной системы, позволит увеличить эквивалентную базу антенны, тем самым увеличить протяженность ее зоны Френеля [2]. Под **сфокусированной многопозиционной антенной** в дальнейшем будем понимать **многопозиционную систему излучателей (МСИ) с фокусировкой ЭМИ**, представляющую собой систему, объединяющую отдельные источники излучения. Применение в качестве антенны системы БПЭ – МСИ, позволяет получить необходимое значение плотности потока мощности ЭМИ в точке фокусировки, при относительно небольших расстояниях до зоны биологической безопасности вокруг каждого отдельного источника излучения в МСИ.

В научных работах [3-5], которые были опубликованы в по результатам исследований на кафедре ОРТ ХНУРЭ в 2010-2012 годах были предложены перспективные эффективные мобильные наземные системы БПЭ к труднодоступным объектам с применением в качестве передающей антенны МСИ с пространственно-фазово-частотной (ПФЧ) фокусировкой одноступенчатых дискретных (ОСД) V-образных многочастотных (МЧ) радиоимпульсов и двухслойной ректенной с приемно-выпрямительными элементами (ПВЭ), работающими на ортогональных поляризациях. При этом в точке фокусировки формируется последовательность сфокусированных ПВИ с заданными параметрами, В [3-5] были обоснованы и предъявлены требования к структуре и параметрам излучаемых сигналов для систем БПЭ. Обоснованы и описаны структурно-алгоритмические принципы построения и предложены варианты технической реализации систем БПЭ к труднодоступным горным и наземным объектам, использующие в качестве источников излучения в МСИ РЛС типа «ТОР-1М». Путем расчетов и по результатам математического моделирования проведен анализ основных характеристик ПВЭ и обоснованы требования к конструктивному исполнению, геометрическим размерам и форме ректенны для предложенного варианта технической реализации систем БПЭ. Предложен схемно-конструктивный вариант построения ректенны, работающей на ортогональных поляризациях и рассчитаны ее основные параметры.

Однако, в этих работах не была определена строгая методика расчета основных характеристик предложенных систем БПЭ и расчет КПД ректенн был проведен без учета направленных свойств излучателей в МСИ. Дальнейшие исследования в этом направлении позволили уточнить требования к основным параметрам структуры излучаемых сигналов для этих систем БПЭ и уточнить

результаты расчетов по оценке их производительности. Целью данной статьи является устранение этих пробелов и уточнения основных параметров систем БПЭ и их основных характеристик.

1 Основные соотношения, описывающие электромагнитное поле излучения многопозиционной системы излучателей на плоских фазированных антенных решетках с пространственно-фазово-частотной фокусировкой одноступенчатых дискретных V-образных многочастотных сигналов

Распределение начальных частот источников излучения в МСИ с фокусировкой ОСД V-образных МЧ сигналов при небольшом числе источников излучения N, можно записать в упрощенном виде [2]:

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

где f_0 - начальная частота центрального источника излучения в МСИ, f_{0n} - начальная частота n-го

источника излучения в МСИ, $\Delta F_n = \Delta F_{\max}/n$ – значение величины дискретности установки частоты между соседними излучателями в МСИ, ΔF_{\max} – максимальный разнос несущих частот излучателей по апертуре МСИ,

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

Распределение начальных фаз излучателей в МСИ для когерентного сложения ЭМИ в точке фокусировки R_F , расположенной на оси OZ прямоугольной системы координат, также можно записать в упрощенном виде [2]:

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

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 $R_F(x_F, y_F, z_F)$ и (x_n, y_n, z_n) соответственно, c – скорость света, z_F – расстояние между точкой фокусировки и центральным излучателем МСИ по оси OZ.

Спектральная плотность потока мощности ЭМИ в точке фокусировки описывается соотношением [2]:

$$S(x, y, z, t) = \left| \sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} \sqrt{\frac{P_n G_n}{4\pi R_n^2}} e^{-j \left[2\pi f_{0n} \left(t - \frac{R_n}{c} \right) + \varphi_{0n} \right]} \right|, \quad (3)$$

где соответственно $S(x, y, z, t)$ – спектральная плотность потока мощности ЭМИ в момент времени t ; P_n и G_n – мощность и коэффициент усиления n-го излучателя в МСИ; $R_n = [(x - x_n)^2 + (y - y_n)^2 + (z - z_n)^2]^{1/2}$ – расстояние до точки наблюдения от n-го излучателя.

Система декартовых координат и расположение в ней МСИ и точки фокусировки в пространстве показаны на Рис.1.

Для систем БПЭ к наземным объектам в качестве излучателей в МСИ в [3-5] предлагается использовать станции наведения ракет (СНР) зенитно-ракетного комплекса (ЗРК) типа «ТОР-М1» [6]. Их технические и конструктивные параметры приняты исходными для передающей подсистемы предлагаемой системы БПЭ. Они имеют закрепленные на кабинах квадратные ФАР с размерами $L_x=L_y=1,7$ м и высотой их фазовых центров $h_a=5$ м. Максимальную дальность фокусировки для БПЭ-1 к наземным объектам при высоте фазовых центров ФАР в СНР h_a и ректенн h_p целесообразно задавать не более дальности прямой радиолокационной видимости $D_{ПВ}$, рассчитываемой по широко известной простой формуле:

$$z_{F1} \leq D_{ПВ} = 4,12[(h_a)^2 + (h_p)^2]^{1/2}, \quad (5)$$

где $D_{ПВ}$ имеет размерность [км], h_a и h_p – размерности [м].

Стандартными размещениями можно считать установку СНР с ФАР и ректенны на земной поверхности в типовых кабинах при $h_a=h_p=5$ м, тогда максимальная дальность для системы фокусировки равна:

$$z_{F1} \leq D_{ПВ} = 4,12[(h_a)^2 + (h_p)^2]^{1/2} = 4,12[(5)^2 + (5)^2]^{1/2} \approx 29 \text{ км.}$$

Для системы БПЭ-2 к горному объекту с фазовым центром ректенны, расположенным на высоте от подножия горы $h_{p2}=5$ км и на дальностях от точки его проекции на плоскость подножия до фазовых центров ФАР k -х РЛС в МСИ $D_p=5$ км, наклонные дальности фокусировки ЭМИ будут не более:

$$z_{F2 \max} \leq D_H = [(h_{p2})^2 + (D_{pm})^2]^{1/2} = [(25 \cdot 10^3) + (25 \cdot 10^3)]^{1/2} \approx 7 \text{ км.}$$

2. Методика расчета основных параметров для систем БПЭ

Проведем обоснование к основным параметрам предлагаемых систем БПЭ. Для достижения максимального значения плотности потока мощности в максимуме $S(z_F)_{\max}$ сфокусированных ПВИ необходимо размещать ректенну приемной подсистемы БПЭ в начале ближней зоны апертуры МСИ передающей подсистемы. В [3-5] показано, что при использовании в МСИ ПФЧ фокусировки ОСД V-образных МЧ сигналов, при выборе точки фокусировки на дальности $z_F^M > 4$, формируется пачка сфокусированных ПВИ. Для обеспечения выполнения этого условия ректенны в предлагаемых системах БПЭ необходимо размещать на дальности не менее $z_F^M = 10$. Кроме того, для снижения энергетических потерь и обеспечения минимальных размеров зон биологической безопасности, сечения ДН должны быть согласованы с геометрическими размерами ректенны с учетом коэффициента эффективности использования ее геометрической площади и ошибок по точности осуществления фокусировки ЭМИ. Таким образом, апертура ректенны должна иметь круглую форму, т.к. ДН передающей подсистемы на МСИ имеет круглую форму и для обеспечения устойчивости к повышенной ветровой нагрузке должны иметь небольшую площадь. Для обеспечения удобства в эксплуатации для БПЭ-1 они могут быть с радиусом $r_{KP1} = 1,25 \dots 1,5$ м, а для БПЭ-2 - $r_{KP2} = 0,4 \dots 0,5$ м. Поэтому, как это будет ниже подтверждено расчетом, для БПЭ-1

при максимальной дальности фокусировки ЭМИ $z_{F1 \max} = 29$ км размер базы эквивалентной апертуры МСИ $L_{M1} = 1000$ м, а для БПЭ-2 при максимальной дальности фокусировки ЭМИ $z_{F2 \max} = 7$ км - $L_{M2} = 700$ м.

По известному из теории антенн соотношению проведем расчет геометрических размеров сечения ДН передающих подсистем БПЭ по оси ОУ (Рис. 1) на максимальных дальностях фокусировки для системы БПЭ-1 - $z_{F1 \max} = 29$ км и для системы БПЭ-2 - $z_{F2 \max} = 7$ км. Соответственно получим: для системы БПЭ-1 - $\Delta y_{F1 \max} = 2,03$ м, а для системы БПЭ-2 - $\Delta y_{F2 \max} = 0,7$ м.

Для исключения энергетических потерь на ректенне приемной подсистемы из-за возможных ошибок по точности осуществления фокусировки ЭМИ в пространстве как следствие возможных отклонений электрических и конструктивных параметров передающей подсистемы (около 10%) и с учетом коэффициента эффективного использования геометрической площади апертуры ректенны $K_{на}$ (в среднем для ректенн порядка $K_{на} = 0,8$ [1]), предлагается геометрический размер радиуса ректенн брать из условия: для БПЭ-1 $r_{KP1} = 1,3 \Delta y_{F1 \max} / 2$, а для БПЭ-2 - $r_{KP2} = 1,3 \Delta y_{F2 \max} / 2$.

Таким образом, для систем БПЭ-1 и БПЭ-2 можно соответственно принять: $r_{KP1} = 1,34$ м и $r_{KP2} = 0,46$ м.

Примем минимальные дальности на которые будет осуществляться фокусировка ЭМИ в системе БПЭ-1 $z_{F1 \min} = 5$ км, а для системы БПЭ-2 - $z_{F2 \min} = 3$ км. При этом для того чтобы осуществлять фокусировку ЭМИ системой БПЭ-1, например, на дальности $z_{F1} = 5, 10, 15, 25$ км используя ректенну с $r_{KP1} = 1,34$ м, а системой БПЭ-2, используя ректенну с $r_{KP2} = 0,46$ м - на дальности $z_{F2} = 3,5, 4, 4,5, 5, 5,5, 6, 6,5$ км, необходимо варьировать величиной геометрического размера базы эквивалентной апертуры МСИ L_{M1} и L_{M2} . Величина L_{M1} и L_{M2} для требуемых значений z_{F1} и z_{F2} определяется по

$$L_{M1} = \lambda z_{F1} / \Delta y_{F1 \max}, \text{ а } L_{M2} = \lambda z_{F2} / \Delta y_{F2 \max}. \quad (6)$$

С учетом определенных выше для системы БПЭ-1 - $\Delta y_{F1 \max} = 2,03$ м, а для системы БПЭ-2 - $\Delta y_{F2 \max} = 0,7$ м из (6) получаем соответственно для $z_{F1} = 5, 10, 15, 25$ км, $L_{M1} = 172, 345, 517, 690, 862$ м и для $z_{F2} = 3,5, 4, 4,5, 5, 5,5, 6, 6,5$ км, $L_{M2} = 350, 400, 450, 500, 550, 600, 650$ м.

Структура системы БПЭ-1 к труднодоступному наземному объекту, расположенному на дальности прямой видимости, использующей в приемной подсистеме круглую ректенну и в передающей подсистеме МСИ, содержащую РЛС с ФАР, представлена на рис. 2 [3-5].

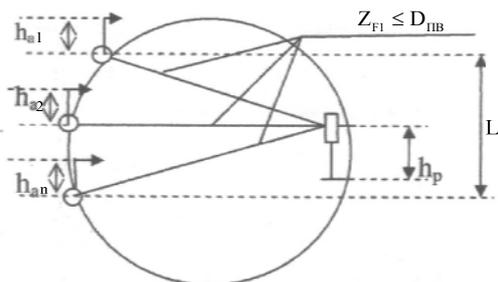


Рис. 2. План системы БПЭ-1 (вид сверху)

Обоснуем требования к количеству РЛС с ФАР используемых в качестве источников излучения в МСИ передающих подсистем БПЭ-1 и БПЭ-2.

ФАР предлагаемых к использованию РЛС содержат $n_{ПД}=4$ квадратных подрешеток с размерами и числом излучателей соответственно: $(L_{ПД})^2=(85 \times 85) \text{ см}^2$ и $n_{ПФ}=(n \times m)=(12)^2=144$ [6]. Длина волны и интервалы между излучателями при квадратной подрешетке, размере ее сторон $L_{ПД}=0,85 \text{ м}$ и числе излучателей $n=m=12$ могут быть соответственно $\lambda_0 \leq (L_{ПД}/n)=(0,85/12) \approx 0,07 \text{ м}$ и $d_{ХПФ}=d_{УПФ} \approx 0,07 \text{ м}$. Коэффициенты усиления подрешеток ФАР при работе с узким лучом круглого сечения $G_{ПФ} \approx (15000/4)=3750$ [6]. Мощности радиоимпульсов в МЧ когерентной пачке для всех излучателей каждой из подрешеток ФАР около $P_{nm}=21,5 \text{ Вт}$, а полная мощность импульсного излучения каждой подрешетки $P_{ПФ}=n_{ПФ} \times P_{nm}=144 \times 21,5 \approx 3,1 \text{ кВт}$ [6].

При равномерном амплитудном распределении сигналов излучателей по апертуре МСИ и одинаковых апертурных излучателях, учитывая, что при фокусировке ЭМИ обеспечивается синфазное сложение полей в точке фокусировки (на ректенне приемной подсистемы), для расчета плотности потока мощности ОСД V-образных МЧ когерентных пачек простых радиоимпульсов может применяться выражение следующего вида [17]:

$$S_{1,2 \text{ max}} = N_{1,2 \text{ МС}}^2 \frac{P_{ПФ} G_{ПФ}}{4 \pi z_{F_{1,2}}^2}, \quad (7)$$

где $N_{1 \text{ МС}}$ – количество подрешеток ФАР, входящих в РЛС передающей подсистемы БПЭ-1, $N_{2 \text{ МС}}$ – количество подрешеток ФАР, входящих в РЛС передающей подсистемы БПЭ-2.

Количество РЛС с ФАР в МСИ передающих подсистем БПЭ определяет величину плотности потока мощности создаваемой в точке фокусировки (на ректенне приемной подсистемы БПЭ). Для исключения ФПР ректенны, физика процесса которого подробно рассмотрена в подразделе 2.2, необходимо определить величину плотности потока мощности ФПР СВЧ диодов, которая определяется следующим соотношением [2]:

$$S_{ФПД} = P_{ФПР} / A_{эф}. \quad (8)$$

мощность воздействующей пачки ПВИ передающей подсистемы для ФПР СВЧ-диодов равна $P_{ФПР}=0,3 \dots 50 \text{ мВт}$, а $A_{эф}$ излучающего элемента ПВЭ ректенны при $\lambda_0=0,07 \text{ м}$ приблизительно равна $A_{эф}=3,5 \text{ см}^2$ [2]. При среднем значении $P_{ФПР}=25 \text{ мВт}$, $S_{ФПД}=7,14 \text{ мВт/см}^2$. Тогда величина максимальной допустимой плотности потока мощности ЭМИ (с двойным запасом) на ректенне не должна превышать значения $S_{\text{max доп.}}=3,57 \text{ мВт/см}^2$. Исходя из этого условия определим из соотношения (7) необходимое количество подрешеток ФАР, входящих в РЛС передающей подсистемы БПЭ-1 $N_{1 \text{ МС}}$ и БПЭ-2 – $N_{2 \text{ МС}}$ по следующему соотношению:

$$N_{1,2 \text{ МС}} = (S_{\text{max доп.}} 4 \pi Z_{F_{1,2 \text{ min}}}^2 / P_{ПФ} G_{ПФ})^{1/2} \quad (9)$$

Из (9) с округлением до целого числа получаем, что $N_{1 \text{ МС}}=36$, а $N_{2 \text{ МС}}=20$. Следовательно, так как в ФАР

РЛС состоит из четырех подрешеток, то количество РЛС в МСИ для БПЭ-1 равно $k_1=9$, а для БПЭ-2 – $k_2=5$.

На основании выполненного в [3-5] анализа требований к подсистемам рассматриваемых БПЭ, результаты которого кратко изложены и уточнены выше, могут быть выбраны следующие взаимосогласованные параметры приемной и передающей подсистем БПЭ к труднодоступным наземным и горным объектам:

1. Передающие подсистемы: вогнутые сегментные МСИ с базами, определяемыми длинами хорд сегментов, и РЛС с ФАР, размещаемыми по дуге сегментов с радиусами $r_{C1,2} = L_{M1,2}/2$:

1.1. Для подсистем БПЭ к наземным объектам база $L_{M1}=172 \dots 1000 \text{ м}$, число РЛС с ФАР $k_1=9$, дальность фокусировки $z_{F1} \leq D_{ПВ} \leq 5 \dots 29 \text{ км}$.

1.2. Для подсистем БПЭ к горным объектам база $L_{M2}=350 \dots 700 \text{ м}$, число РЛС с ФАР $k_2=5$, дальность фокусировки $z_{F2}=D_H=3,5 \dots 7 \text{ км}$.

1.3. ФАР содержат $n_{ПД}=4$ квадратных подрешеток с размерами и числом излучателей соответственно: $(L_{ПД})^2=(85 \times 85) \text{ см}^2$ и $n_{ПФ}=(n \times m)=(12)^2=144$.

1.4. Длина волны центральной РЛС в МСИ $\lambda_0=0,07 \text{ м}$.

1.5. Коэффициенты усиления подрешеток ФАР при работе с узким лучом круглого сечения $G_{ПФ} \approx (15000/4)=3750$.

2. Размеры апертур ректенн приемных подсистем БПЭ-2, а также БПЭ-1 могут быть равными $A_{P2}=\pi(r_{P2})^2=\pi(0,46)^2=0,212 \text{ м}^2$ и $A_{P1}=\pi(r_{P1})^2=\pi(1,34)^2=2,37 \text{ м}^2$.

3. Обобщенная структура систем БПЭ-1 и БПЭ-2 на основе ректенн и МСИ, содержащих РЛС с ФАР, приведена (вид сверху) на рис. 2.

4. Излучаемые сигналы: ОСД V-образные МЧ когерентные пачки простых радиоимпульсов:

4.1. Мощности радиоимпульсов излучателей каждой из подрешеток ФАР около $P_{nm}=21,5 \text{ Вт}$, а полная мощность импульсного излучения каждой подрешетки $P_{ПФ}=n_{ПФ} \times P_{nm}=144 \times 21,5 \approx 3,1 \text{ кВт}$ [6].

4.2. Диапазон начальных частот сигналов излучателей в k-ых РЛС

должен быть равен $f_{0nm} \approx (4,3 \pm 0,1) \text{ ГГц}$, максимальный разнос частоты $\Delta F_{\text{max}}=50 \text{ МГц}$ и дискретность частоты $\Delta F=12,5 \text{ МГц}$.

4.3. Структуру пачек ПВИ для исключения вывода ими ректенн из строя целесообразно создавать в виде двух частей, которые при необходимости длительного времени воздействия пачек ПВИ на ректенну приемной подсистемы БПЭ излучаются несколько раз подряд:

4.3.1. Первая часть структуры наряду с принятыми в предыдущих пп. 4.2 и 4.3 частотно-временными параметрами для исключения, как минимум, с десятикратным запасом возможности вывода из строя ректенн должна иметь соответственно следующие число импульсов в пачке ПВИ и ее длительность без учета интервалов между импульсами:

$$N_{ВП} = (N_{ВП}/10) = 10^6. \quad (10)$$

период повторения импульсов в первой части структуры пачек ПВИ при $\tau_B=20 \text{ нс}$ принимается $T_B=80 \text{ нс}$ и их скважность $Q_B=4$;

4.3.2. В конце такой первой части структуры ПВИ предусматривается вторая часть в виде свободного интервала времени (без заполнения импульсами ПВИ), равного $\tau_{\text{max}}=410$ нс. Он обеспечивает надежную релаксацию тепловых эффектов, вызванных воздействием первой части структуры ПВИ.

Полная длительность такой структуры пачек ПВИ $\tau_{\text{BЭС}}$ определяется из соотношения (4)

3 Результаты математического моделирования поля на апертуре ректенны с учетом направленных свойств излучателей МСИ в системе БПЭ-1

В данном подразделе решалась задача математического моделирования поля на апертуре ректенны для системы БПЭ-1 при заданной геометрии расположения излучателей в МСИ (рис. 3) с учетом их направленных свойств. Излучающими элементами МСИ являются плоские квадратные ФАР с рупорными излучателями[6].

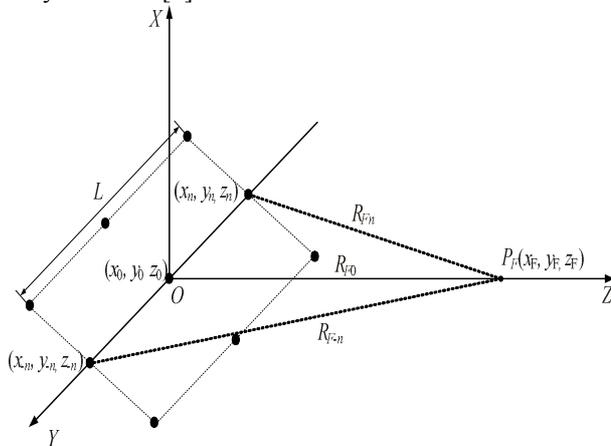


Рис. 3. Расположения излучателей в МСИ

Выбор размещения излучателей, в МСИ передающей подсистемы БПЭ, как показано на рис. 3, позволяет получить на апертуре ректенны осесимметричное амплитудное распределение поля и применить разработанные ранее методики анализа крупноапертурных ректенн при неравноамплитудном возбуждении [1, 7].

Используя в качестве исходного соотношение (3), запишем выражение для излучаемой плотности потока мощности многопозиционной передающей антенны (рис. 3) с учетом направленных свойств ее излучающих элементов

$$S(x,y,z,t) = \left[\sum_{n=-\frac{N_x-1}{2}}^{\frac{N_x-1}{2}} \sum_{m=-\frac{N_y-1}{2}}^{\frac{N_y-1}{2}} \sqrt{\frac{P_{nm} G_{nm}}{4\pi R_{nm}^2}} F_{nm}(\theta,\varphi) e^{-j\left[2\pi f_{0nm}\left(t-\frac{R_{nm}}{c}\right)+\varphi_{0nm}\right]} \right]^2, \quad (11)$$

где $F_{nm}(\theta,\varphi)$ – нормированная диаграмма направленности по полю nm -го излучателя многопозиционной антенны, которую можно определить в соответствии с правилом перемножения ДН [7]

$$F(\theta,\varphi) = F_0(\theta,\varphi) F_\delta(\theta,\varphi), \quad (12)$$

где $F_0(\theta,\varphi)$ – нормированная диаграмма направленности одиночного излучателя, $F_\delta(\theta,\varphi)$ – множитель решетки.

В предположении, что излучателями ФАР являются пирамидальные рупора искажения фазы в раскрыве которых невелики: меньше, чем $\pi/8$ в Е-плоскости (угломестной) $F^E(\theta)$ и меньше, чем $\pi/4$ в Н-плоскости (ази-мутальной) $F^H(\theta)$ (в этом случае раскрыв можно считать синфазным) амплитудные ДН будут описываться следующими выражениями [7]:

$$F^E(\theta) = \frac{1 + \cos\theta \sin\Psi}{2\Psi},$$

$$F^H(\theta) = \frac{1 + \cos\theta}{2} \frac{\pi}{4} \left[\frac{\sin\left(\Psi + \frac{\pi}{2}\right)}{\Psi + \frac{\pi}{2}} + \frac{\sin\left(\Psi - \frac{\pi}{2}\right)}{\Psi - \frac{\pi}{2}} \right], \quad (13)$$

где $\Psi = \frac{\pi L_{E,H}}{\lambda} \sin\theta$ – обобщенный угол, $L_{E,H}$ – размеры раскрыва рупора в угломестной и азимутальной плоскостях.

Множитель решетки с прямоугольной сеткой удобно представить в виде [7]

$$f_\delta(\theta,\varphi) = \sum_{p,l} A_{p,l} e^{j[\varphi_{p,l} + k p d_x \cos\theta_x + k l d_y \cos\theta_y]}, \quad (14)$$

где значения p, l определяют номера излучателей, стоящих на пересечении p -й строки и l -го столбца, $\cos\theta_x = \sin\theta \cos\varphi$, $\cos\theta_y = \sin\theta \sin\varphi$ – направляющие косинусы, k – волновое число, $d_{x,y}$ – шаг решетки (в дальнейших расчетах положим $\varphi_{p,l} = 0$ и тогда шаг решетки выберем из условия единственности главного лепестка: $d_{x,y} \leq \lambda = 0,07$ м).

Предположим, что для системы пирамидальных рупоров амплитудное распределение по апертуре антенной решетки является разделяющимся

$$A(x,y) = A(x)A(y).$$

В этом случае наиболее общей функцией амплитудного распределения поля в раскрыве является зависимость вида[8]

$$A_{p,l} = \left[\Delta_x - (1 - \Delta_x) \sin^\alpha \frac{\pi p}{M_x - 1} \right] \times \left[\Delta_y - (1 - \Delta_y) \sin^\beta \frac{\pi l}{M_y - 1} \right],$$

где $\Delta_x, \Delta_y \in (0, 1)$, M_x, M_y – число рупорных излучателей в соответствующих плоскостях, $\alpha, \beta = 0, 1, 2 \dots$.

Выбирая параметры $\Delta_x, \Delta_y, \alpha, \beta$ можно с достаточной для практики точностью аппроксимировать всевозможные реальные амплитудные распределения.

На рис. 4 приведена диаграмма направленности множителя решетки ФАР с равномерным амплитудным распределением. Таким образом, следует ожидать, что направленные свойства излучателей позволят подавить дифракционные максимумы МСИ.

На рис. 5-8 приведены результаты математического моделирования поля для системы БПЭ-1 в плоскости расположения ректенны по соотношению (11) с учетом выражений (12) – (14) при различных расстояниях до точки фокусировки Z_{F1} .

Как видно из приведенных зависимостей, СВЧ-пучок сфокусирован в плоскости расположения ректенны.

Для наглядности на рис. 9 приведено распределение нормированной плотности потока мощности на апертуре ректенны радиусом ρ при фокусировке на 15 км (база 517 м) (сплошная линия) и на 29 км (база 1000 м) (кружочки).

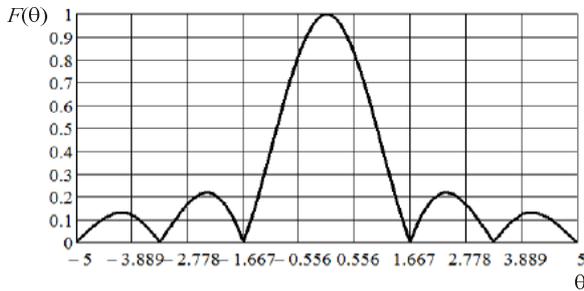


Рис. 4. Диаграмма направленности множителя решетки в вертикальной плоскости

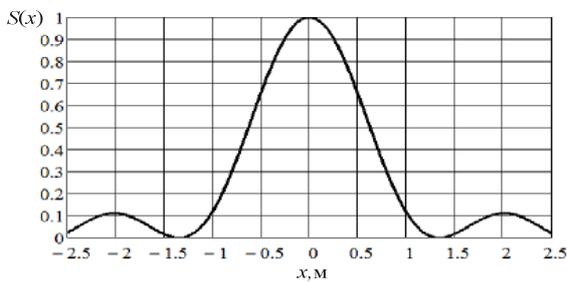


Рис. 5 Нормированная плотность потока мощности в плоскости расположения ректенны ($Z_{F1}=15$ км, база МСИ – $L_{M1}=517$ м)

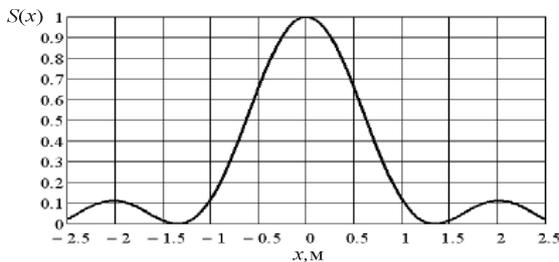


Рис. 6. Нормированная плотность потока мощности в плоскости расположения ректенны ($Z_{F1}=29$ км, база МСИ – $L_{M1}=1000$ м)

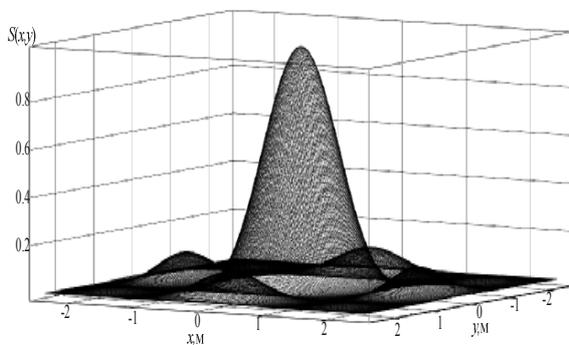


Рис. 7. Трехмерное распределение плотности потока мощности в плоскости расположения ректенны ($Z_{F1}=15$ км, $L_{M1}=517$ м)

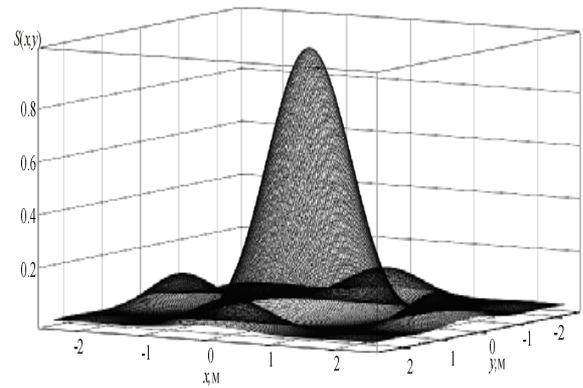


Рис. 8. Трехмерное распределение плотности потока мощности в плоскости расположения ректенны ($Z_{F1}=29$ км, $L_{M1}=1000$ м)

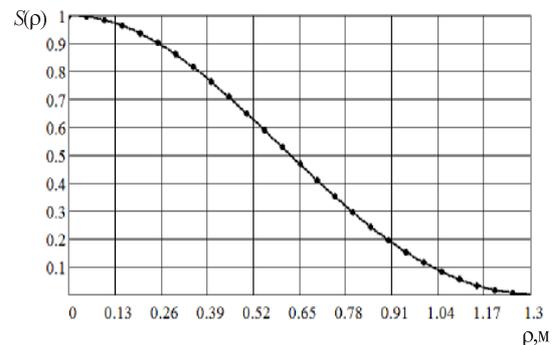


Рис. 9. Распределение нормированной плотности потока мощности на апертуре ректенны

Полученные зависимости подтверждают результаты расчета, приведенные в разд. 2 и позволяют сделать вывод, что предложенный вид фокусировки имеет существенное преимущество перед традиционной ПФ фокусировкой по ряду причин:

1. При фиксированном радиусе ректенны (в несколько раз меньшим, чем при традиционном виде фокусировки [1]) можно получить необходимое амплитудное распределение на ее апертуре, позволяющее реализовать высокие значения КПД перехвата, что достигается выбором геометрических размеров эквивалентной базы МСИ L_M передающей подсистемы БПЭ.

2. Необходимая спектральная плотность, для получения заданной мощности в нагрузке ректенны обеспечивается варьированием числа излучателей в МСИ.

3. КПД перехвата СВЧ-энергии апертурой ректенны можно получить более 80 % (для нашего примера КПД перехвата составляет $\eta=87$ %).

4. Существенно уменьшаются границы зон безопасности за счет отсутствия зависимости геометрических размеров области фокусировки с увеличением расстояния до точки фокусировки.

4 Анализ и расчет основных параметров ректенны по постоянному току

Анализ крупноапертурных ректенных систем при неравноамплитудном возбуждении представляет собой существенно более сложную задачу, чем анализ таких систем в равноамплитудном поле. Неравноамплитудное воздействие приводит к невозможности анализа ректенны как единого целого. Ректенна не может быть рассмотрена как бесконечная решетка из-за неперIODичности воздействия, а поэлементный подход оказывается неприемлемым из-за чрезвычайно большой размерности задачи. В работе [1] разработана методика расчета крупноапертурных ректенн, согласно которой задача их анализа разбивается на две.

Суть первой из них заключается в вычислении энергетических характеристик приемно-выпрямительной апертуры (расчет КПД выпрямления, токов высших гармоник, параметров эквивалентных ГПТ). При решении второй задачи находятся параметры всей ректенны как совокупности эквивалентных ГПТ, соединенных схемой сбора мощности постоянного тока, которая в общем случае имеет произвольную топологию (рис. 10).

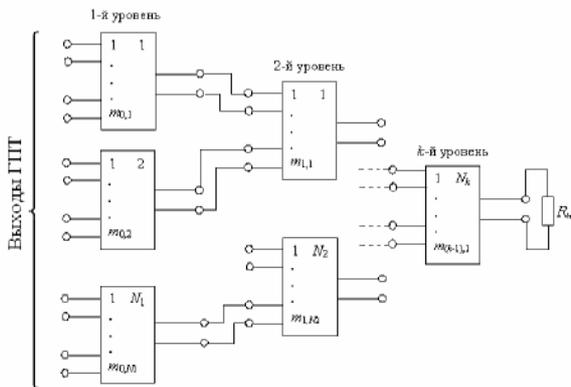


Рис. 10. Схема сбора ректенны

Для упрощения решения первой задачи необходимо ввести еще одно предположение относительно характера изменения амплитудного распределения в раскрыве ректенны. Известно [8], что для достижения высоких значений КПД перехвата ректенна должна облучаться неравномерным СВЧ-пучком (рис. 10), распределение поля по сечению которого описывается медленно спадающей функцией Гаусса. На основании этого далее полагаем, что амплитудное распределение по ПВА есть медленно меняющаяся функция координат. При принятом упрощении естественно предположить, что характеристики *i*-го и соседних с ним ПВЭ мало отличаются друг от друга в пределах зоны их взаимодействия, что позволяет представить ПВА ректенны в виде ряда концентрических зон, в которых размещены ПВЭ с одинаковыми параметрами.

При таком представлении реальное гауссовское амплитудное распределение заменяется ступенчатой функцией. В конечном итоге это позволяет рассчитать характеристики *i*-го ПВЭ любой зоны как элемента в составе бесконечной решетки при уровне воздействия, равном значению поля в месте расположения ПВЭ.

Апертура ректенны была разбита на четыре кольцевые зоны (рис. 11) путем деления радиуса апертуры на четыре равных отрезка.

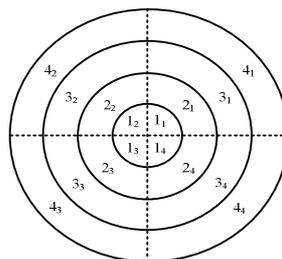


Рис. 11. Представление апертуры ректенны в виде кольцевых зон

Величины ступенек функции, аппроксимирующей амплитудное распределение показана на рис. 12.

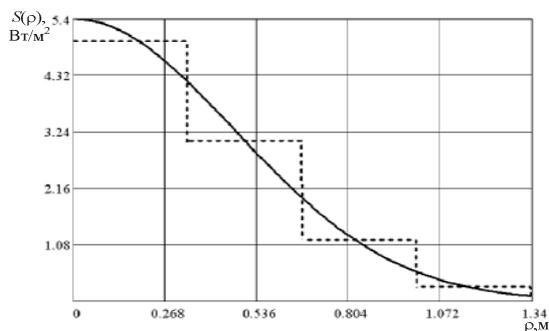


Рис. 12. Амплитудное распределение и его аппроксимация

В табл. 1 приведены результаты расчета значений плотности потока мощности, КПД выпрямления, входной мощности, эквивалентных ЭДС и сопротивлений ПВЭ по постоянному току для соответствующих зон (рис. 11).

Таблица 1

Результаты расчета основных параметров ректенны для системы БПЭ-1 при $Z_{F1}=15$ км

№ зоны	$P_{\text{вх}i}$, Вт/м ²	$\eta_{\text{г}}$, %	$P_{\text{ад}i}$, мВт	E_i , В	R_{i} , Ом
1	4,98	65,74	2,32	3,09	1179,9
2	3,10	55,98	1,43	2,42	1045,8
3	1,16	44,54	0,54	1,149	1042,3
4	0,27	15,88	0,13	0,72	1053,8

5 Обоснование и выбор топологии схемы сбора мощности постоянного тока для ректенны

Исходными данными для анализа параметров ректенны с учетом схемы сбора постоянной мощности являются: структура ССМ, характеристики ПВЭ ректенны, значения сопротивления нагрузки. В ходе вычислений должны быть найдены: мощность, отдаваемая ректенной в нагрузку; токи и напряжения в нагрузках; КПД ректенны.

Крупноапертурные ректенны строятся по модульному принципу. На первом уровне ПВЭ ректенны объединяются последовательно (или параллельно) в группы, которые будем называть модулями первого уровня. На втором уровне модули первого уровня объединяются параллельно (или последовательно) в модули второго уровня и т.д. На последнем k -м уровне модули $k-1$ уровня подключаются последовательно (или параллельно) к одной из нагрузок ректенны $R_{н}^q$. Данный способ построения крупноапертурных ректенн обусловлен прежде всего его технологичностью, а следовательно, и более низкой стоимостью изготовления ректенн. Схема сбора мощности представляет собой многоуровневую последовательно-параллельную схему (рис. 11). В частном случае одноуровневой ССМ она является однотипным соединением ПВЭ ректенны, подключаемых к q -й нагрузке.

Структурной единицей последовательно-параллельных схем являются модули, образованные однотипным (последовательным или параллельным) соединением модулей предыдущего уровня. Каждый из них может быть рассмотрен как эквивалентный генератор постоянного тока (или ЭДС), характеристики которого определяются параметрами эквивалентных генераторов модулей предыдущего уровня; если модуль образован последовательным соединением ГПТ с нагрузкой, то его удобно рассматривать как эквивалентный генератор ЭДС, а при параллельном единении – как эквивалентный генератор тока.

Одним из критериев эффективности систем БПЭ является величина КПД, определяемая потерями перехвата, выпрямления и сбора. Как уже установлено предыдущими исследованиями [1], для повышения КПД перехвата апертура ректенны должна облучаться неравномерно. Причем, если в системах БПЭ применяются ректенны с однотипными ПВЭ и простыми схемами сбора, то с ростом КПД перехвата КПД сбора падает, что приводит к низкой эффективности системы БПЭ в целом. Поэтому, вопросы разработки принципов построения ректенн с высоким КПД сбора при существенно неравномерном облучении апертуры является весьма актуальным.

Природа потерь мощности постоянного тока достаточно понятна. Каждый ПВЭ ректенны можно трактовать как эквивалентный ГПТ. В силу неравномерности облучения ректенны, зависящие от плотности потока мощности падающего луча, эквивалентные ЭДС, токи и внутренние сопротивления названных ГПТ будут существенно отличаться. По этой причине последовательное или параллельное объединение неидентичных генераторов для работы на одну нагрузку приводит к рассеиванию части мощности на сопротивлении потерь диодов Шоттки.

Одним из эффективных способов уменьшения потери сбора мощности постоянного тока является усложнение топологии схемы сбора и применения таких

комбинаций последовательно-параллельных соединений, при которых минимизируются перепады (относительные разности) эквивалентных параметров ГПТ, объединяемых в одну группу или в ряд групп и между группами.

Многочисленные расчеты, проведенные в [1] показали, что при данном способе для типовых одно- и двух-полупериодных ПВЭ потери при сборе мощности постоянного тока не превышают (2–2,5) %, если перепады ЭДС и токов объединяемых ГПТ будут не более 30 %.

Предлагается такой алгоритм оптимизации топологии параллельно-последовательной ССМ:

а) разбиваем каждую кольцевую зону первого и второго слоя ректенны на четыре модуля (рис. 11); номера модулей индексированы двумя числами (первое число обозначает номер зоны, к которой они принадлежат, а второе – номер модуля);

б) формируем независимо ССМ для первого и второго слоя ректенны;

в) объединяем ПВЭ как эквивалентные ЭДС постоянного тока в каждом модуле последовательно;

г) комплектуем группы из модулей при условии, что перепад ЭДС в пределах группы не превышает 30 %;

д) соблюдаем следующий порядок включения модулей в группы – сначала соединяем первый и второй, третий и четвертый модули первой зоны последовательно; модули второй зоны параллельно; модули третьей зоны параллельно; модули четвертой зоны последовательно;

е) сформированные группы соединяем параллельно и также соединим параллельно ССМ первого и второго слоя ректенны.

Далее на основе полученных в [1] соотношений для комбинированных схем сбора мощности постоянного тока был проведен расчет КПД выпрямления и сбора ректенны.

КПД схемы сбора ректенны составляет $\eta_0 = 89,7$ %, что доказывает эффективность предлагаемой методики оптимизации и возможность минимизации потерь мощности постоянного тока, средний КПД выпрямления ректенны (из табл. 1) равен $\eta_r = 45,6$ %.

Таким образом, суммарный КПД ректенны для системы БПЭ-1 равен 35,6%

Заключение

Рассмотрен комплекс вопросов, связанный с совершенствованием способов построения эффективных систем БПЭ в труднодоступные районы.

Получены следующие новые результаты.

1. Применение в качестве передающей антенны в предложенных системах БПЭ МСИ, позволяет увеличить протяженность зоны Френеля за счет возможности обеспечения требуемых размеров эквивалентной апертуры базы МСИ. Это позволяет размещать ректенну на дальностях 0,005...0,02 от дальней границы зоны Френеля, где достигается наибольший выигрыш по

величине, создаваемой при фокусировке плотности потока мощности ЭМИ.

2. Использование в предложенных системах БПЭ ПФЧ фокусировки ОСД V-образных МЧ радиоимпульсов, позволяет обеспечить требуемые параметры излучаемых сигналов для повышения эффективности систем БПЭ.

3. Предъявлены требования к структуре излучаемой последовательности сфокусированных ПВИ, позволяющие решить компромиссную задачу обеспечения максимального значения передаваемой плотности потока мощности ЭМИ, при исключении условий осуществления ФПР полупроводниковых радиоэлементов и ФПД РЭС потребителей энергии, находящихся на приемной подсистеме. При этом обоснованы следующие основные параметры излучаемой последовательности сфокусированных ПВИ:

- длительность сфокусированных ПВИ – не менее 20 нс;

- период следования ПВИ – не менее 80 нс;

- количество ПВИ в пачке – не более 10^6 ;

- интервал между пачками ПВИ – не менее 410 нс.

4. Предложены два варианта систем БПЭ на МСИ, в качестве излучателей которой используются РЛС типа «ТОР-1М»:

- для наземных труднодоступных объектов (БПЭ-1) на дальности прямой видимости – 5...29 км;

- для горных объектов (БПЭ-2) - с наклонной дальностью 3,5...7 км.

5. Проведен расчет следующих основных параметров для предлагаемых систем БПЭ:

- количество РЛС для исключения ФПП РЭС на приемной позиции – для системы БПЭ-1 – 9 РЛС, выбранного типа, для БПЭ-2 – 5 РЛС;

- геометрические размеры круглых ректенн, обеспечивающих устойчивость к повышенным ветровым нагрузкам и удобство в эксплуатации – для системы БПЭ-1 – с радиусом равным 1,34 м, для БПЭ-2 – 0,46 м;

- геометрические размеры эквивалентной апертуры базы МСИ для осуществления фокусировки ЭМИ для БПЭ-1 на дальностях $Z_{f1}=5...29$ км – соответственно $L_{M1}=172...1000$ м, для БПЭ-2 - на дальностях $Z_{f2}=3,5...7$ км – соответственно $L_{M2}=350...700$ м.

6. Проведен расчет параметров электрических параметров, излучаемых сигналов излучателей в МСИ предложенных систем БПЭ для обеспечения требуемой структуры сфокусированных ПВИ:

- несущая частота центрального излучателя в МСИ – 4,3 ГГц;

- дискретность установки несущей частоты по излучателям МСИ – $\Delta F=12,5$ МГц;

- максимальный разнос частот по излучателям в МСИ – $\Delta F_{max}=50$ МГц.

7. Предложена конфигурация ПВЭ, которая позволяет увеличить удельную мощность постоянного тока, снимаемую с квадратного метра апертуры ректенны, а также существенно упростить топологию

схемы сбора мощности и тем самым повысить надежность ректенны.

8. Для расчета КПД ректенны, при моделировании поля на апертуре ректенны, учтены направленные свойства излучателей МСИ.

9. Предложенный вид фокусировки позволяет достичь КПД перехвата СВЧ-энергии апертурой ректенны более 85 % при малых ее радиусах.

10. Предложено использовать блочно-модульную конструкцию ССМ ректенны, что позволяет реализовать не только максимальный КПД сбора, но и повысить надежность ректенны, особенно при работе в системах БПЭ больших мощностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Шокало В.М. Крупноапертурные антенны-выпрямители систем беспроводной передачи энергии микроволновым лучем: моногр. / В. Шокало, А. Лучанинов, А. Рыбалко, Д. Грецьких ; Мин-во Образования и науки Украины, ХНУРЭ / Под ред. В.М.Шокало. – Х.: Коллегиум, 2006. – 308 с.

2. Гомозов, А. Фокусировка электромагнитного излучения и ее применение в радиоэлектронных средствах СВЧ: моногр. / А. Гомозов, В. Гомозов, Г. Ермаков, С. Титов; Мин-во Образования и науки Украины, ХНУРЭ, Нац. косм. агентство Украины, ОАО «АО НИИРИ» / Под ред. В.И. Гомозова. – Х.: КП «Городская типография», 2011. – 330 с.

3. Гомозов, А.В. Передающая подсистема беспроводной передачи энергии к труднодоступным объектам на основе многопозиционной системы излучателей с фокусировкой излучения (Часть 1) / А.В. Гомозов, В.И. Гомозов, В.М. Шокало, Д.В.Грецьких, Ш.Ф.А. Аль-Самарай // Радиотехника. Всеукраинский межведомственный науч.-тех. сб., ХНУРЭ– Вып. 165.– Х., 2011. – С. 112-118.

4. Гомозов, А.В. Возможность реализации системы беспроводной передачи энергии к труднодоступным объектам на многопозиционной системе с фокусировкой излучения и ректенне / А.В. Гомозов, В.М. Шокало, Д.В. Грецьких, Ш.Ф.А. Аль-Самарай // Интегрированные информационные радиоэлектронные системы и технологии: сб. науч. тр. 4-го Междунар. радиоэлектронного форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития». 18-21 октября 2011 г. Ак-я прикл. радиоэл-ки, ХНУРЭ – Том I. Часть 1. – Х., 2011. – С. 365-370.

5. Гомозов, А.В. Передающая подсистема беспроводной передачи энергии к труднодоступным объектам на основе многопозиционной системы излучателей с фокусировкой излучения (Часть 2) / А.В. Гомозов, В.И. Гомозов, В.М. Шокало, Д.В.Грецьких, Ш.Ф.А. Аль-Самарай // Радиотехника. Всеукраинский межведомственный науч.-тех. сб., ХНУРЭ – Вып. 167.– Х., 2011. – С. 18-24.

6. Иванец, Г.В. Боевые средства зенитной ракетной системы «ТОР»: уч. пособие / Г.В. Иванец, В.М. Решетник, Н.В. Яловега,; Мин-во Обороны Украины, Харк. военный ун-т. – Х.: Типография ХВУ, 1997. – 193 с.

7. Корниенко Л.Г. Теория и техника излучающих и направляющих систем / Л.Г. Корниенко. – Х.: МОУ ХВУ, 1994. – 626 с.

8. Ермаков Г.В., Ясечко М.Н. Фокусировка электромагнитного излучения цилиндрической фазированной антенной решеткой с пространственно-фазо-частотным управлением // Системы управління, навігації та зв'язку. – 2010. – № 3(15). – С. 58–62.