УДК 621.396.67

Анализ характеристик излучения двухлучевой плоской микрополосковой антенной решетки радиодоплеровского лага

Analysis of the radiation characteristics of a two-beam flat microstrip antenna array of radio Doppler lag

Крячко / Kryachko A.

Александр Федотович (alex_k34.ru@mail.ru) доктор технических наук, профессор. ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (ГУАП), заведующий кафедрой радиотехнических и оптоэлектронных комплексов. г. Санкт-Петербург

Рыжиков / Ryzhikov M.

Максим Борисович (maxrmb@rambler.ru) кандидат технических наук. ГУАП, доцент кафедры радиотехнических и оптоэлектронных комплексов. г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: микрополосковая антенна – microstrip antenna; дифракционные лепестки – diffraction lobes; диаграмма направленности – antenna radiation pattern.

Приведены результаты моделирования и анализа результатов по оцениванию влияния на характеристики излучения выбора дифракционных максимумов функции направленности антенной решетки с целью формирования наклонного основного луча. Предложена конструкция плоской двухлучевой антенны в микрополосковом исполнении, направления максимумов диаграммы в которой формируются посредством реализации заданного фазового набега в питающей микрополосковой линии. Проведен сравнительный анализ вариантов исполнения антенны и представлены рекомендации, позволяющие снизить плотность размещения излучателей на раскрыве антенны и тем самым уменьшить взаимное влияние излучателей.

The results of modeling and analysis of the results on the evaluation of the influence on the radiation characteristics of the choice of diffraction maxima of the antenna array directivity function in order to form an inclined main beam are presented. A design of a flat two-beam antenna in a microstrip design is proposed, the directions of the maxima of the diagram in which are formed by implementing a given phase raid in the feeding microstrip line. A comparative analysis of the antenna variants is carried out and recommendations are presented to reduce the density of the emitters on the antenna opening and thereby reduce the mutual influence of the emitters.

Новикова / Novikova Yu.

Юлиана Александровна (Nov-Jliana@yandex.ru) кандидат физико-математических наук. ГУАП, доцент кафедры физики. г. Санкт-Петербург

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского Научного Фонда, проект № 23-29-00044.

Введение

Необходимость реализации лага, который работает в радиодиапазоне, базируется на уменьшении эффективности работы подобного рода гидроакустических систем для морских судов на подводных крыльях или на воздушной подушке из-за того, что их корпус не всегда непосредственно контактирует с водной поверхностью. В лаге радиодиапазона для оценки скорости и угла сноса используются две антенны, каждая из которых позволяет формировать на прием и для излучения сигналов по два наклонных луча как с левого, так и с правого борта. Лучи направлены по ходу и против хода движения морского судна [1]. Учитывая стремление снижать затраты на изготовление, а также вес антенных систем, перспективно рассмотреть возможности реализации решеток излучателей с использованием печатной технологии [2].

В статье приводятся как основные соотношения для вычисления характеристик излучения двухлучевых микрополосковых антенных решеток, так и результаты анализа их моделирования при вариациях выбора порядка дифракционных максимумов

при использовании их для формирования основных лучей диаграммы направленности (ДН).

Топология раскрыва. Основные математические соотношения для вычисления ее характеристик излучения

Предложенная двухлучевая микрополосковая антенна содержит в своем составе две подрешетки (с номерами *n*=1 и *n*=2), излучатели которой предлагается разместить по правилу (рис. 1):

$$x_{n.OH} \begin{bmatrix} n_x, n_y \end{bmatrix} = \begin{cases} -0.5D_x + q_1 + [n_x - 1]d_{n.x} & \text{при } n = 1; \\ 0.5D_x - q_5 + [n_x - 1]d_{n.x} & \text{при } n = 2; \end{cases}$$

$$y_{n.OM} \begin{bmatrix} n_x, n_y \end{bmatrix} = \begin{cases} -0, 5D_y + q_3 + \begin{bmatrix} n_y - 1 \end{bmatrix} d_{n.y} & \text{при } n = 1; \\ -0, 5D_y - q_7 + \begin{bmatrix} n_y - 1 \end{bmatrix} d_{n.2} & \text{при } n = 2, \end{cases}$$

где $x_{n.OM}[n_x, n_y]; x_{n.OM}[n_x, n_y]$ – координаты одиночных излучателей *n*-й подрешетки; *D*=0,38 м; *D*=0,38 м – размер полотна антенны; n_v, n_v – номера одиночного излучателя подрешетки; N, N, - число излучателей по осям X и Y; d_{nx}, d_{ny} – расстояние между соседними излучателями по осям X и Y; q_1, q_3, q_5, q_7 - смещения. Значения последних параметров выбираются из следующих соображений:

1) с одной стороны, q_1, q_2, q_5, q_7 следует выбирать

площадь раскрыва микрополосковой антенны: ширина основного луча оказывается минимальной;

2) с другой стороны, соседние излучатели разных подрешеток следует располагать в шахматном порядке на максимальном удалении друг от друга. Тем самым будет обеспечиваться ослабление взаимного влияния [3].

При распределении СВЧ энергии бегущей волной излучателям соответствуют фазы:

$$\phi_{nOH} \begin{bmatrix} n_x; n_y \end{bmatrix} = \begin{cases} (n_x - 1)k_{n \exists} d_{n.x} + (n_y - 1)k_{n \exists} d_{n.y} \text{ при } PS = 1\\ (n_x - 1)k_{n \exists} d_{n.x} + (N_y - n_y)k_{n \exists} d_{n.y} \text{ при } PS = 2. \end{cases}$$

В данном соотношении $\phi_{n,OM}[n_x, n_y]$ – фазы (n_x, n_y) -го излучателя первой (n=1) и второй (n=2) подрешетки соответственно; PS - признак типа запитки (PS=1 прямая запитка излучателей: справа-налево, PS=2 – обратная: слева-направо); $k_{n\pi}$ – волновое число в диэлектрике *n*-й подрешетки:

$$k_{n,\mathrm{II}} = \frac{2\pi\sqrt{\varepsilon_{\mathrm{p}\phi\phi}}}{\lambda} ; \ \varepsilon_{\mathrm{p}\phi\phi} = \frac{\varepsilon+1}{2} + \frac{\varepsilon-1}{2}\frac{1}{\sqrt{1+12\frac{d}{a}}},$$

λ" – длина волны в свободном пространстве сигнала *п*-й подрешетки.

 $\lambda_n = c/f_n, f_n = [4,9 + (-1)n \cdot 0,05]$ ГГц; ε_{abd} – эффекминимальными, чтобы максимально использовалась тивное значение относительной диэлектрической прони-



Рис. 1. Размещение излучателей по раскрыву антенной решетки

ИНФОРМАЦИЯ и КОСМОС №4

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

цаемости подложки толщиной *d* для линии питания шириной а. Рассчитанное для подложки из материала Rogers RO3003 с толщиной *d*≈0,75 мм значение ε_{афф}=2,79. Параметры СВЧ материала представлены в [4]. ДН подрешеток определяется формулой [5]:

$$f_n(\alpha,\beta) = f_{n.\text{OM}}(\alpha,\beta) \cdot f_{n.\text{MP}}(\alpha,\beta),$$

где $f_{n.OM}$ – ДН одиночного излучателя *n*-й подрешетки; α и β – углы сферической системы координат; $f_{nm}(\alpha, \alpha)$ β) – множитель *n*-й решетки [5]:

$$f_{n,\text{Mp}}(\alpha,\beta) = \sum_{n_x=1}^{N_x} \sum_{n_y=1}^{N_y} \left\{ J_n(n_x,n_y) \exp(jk_n \Delta r_n(\alpha,\beta,n_x,n_y) + \phi_{n,\text{OH}}[n_x,n_y]) \right\},$$

где $J_n(n_i, n_j)$ – амплитуда излучения (n_i, n) -го излучателя *п*-й подрешетки;

 $\Delta r_n(\alpha, \beta, n_r, n_r)$ – ход луча одиночного излучателя ниями: *п*-й подрешетки [5]:

$$\Delta r_n(\alpha,\beta,n_x,n_y) = \cos(\beta) \{ x_{n.OH} [n_x,n_y] \cos(\alpha) + y_{n.OH} [n_x,n_y] \sin(\alpha) \},$$

*k*_{*µ*} = 2π/λ_{*µ*} – волновое число в воздушном пространстве *п*-й подрешетки.

Используя резонаторный метод расчета, можно оценить как размер излучающей стороны микрополосковой антенны прямоугольного типа – а, так и вторую сторону – b. При условии достижения максимальной эффективности излучения они определяются соотношениями:

$$a = 0,5\lambda \sqrt{\frac{2}{(1+\varepsilon)}}; b = \frac{\lambda}{2\sqrt{\varepsilon_{s\phi\phi}}} - 2\Delta b;$$
$$\Delta b = 0,412d \frac{\varepsilon_{s\phi\phi} + 0.3}{\varepsilon_{s\phi\phi} - 0.258} \frac{\frac{a}{d} + 0.264}{\frac{a}{d} + 0.8}.$$

Диаграмму направленности МПА можно вычислить, используя формулы [4]:

$$F(\beta, \alpha = 0) = \left(1 + \varepsilon_{a\phi\phi} \left(\operatorname{ctg}\left(\frac{2\pi\sqrt{\varepsilon_{a\phi\phi}}d}{\lambda}\right)\right)^{2}\right) \left(\frac{\varepsilon_{a\phi\phi}}{\xi_{1}(\beta^{n})}\right)^{2} \times \frac{\left(\cos(0, 5k_{a}\cos(\beta))\sin(\beta)\right)^{2}}{\left(\xi_{1}(\beta)\right)^{2} + \left(\varepsilon_{a\phi\phi}\sin(\beta)\operatorname{ctg}\left(\frac{2\pi\xi_{1}(\beta)d}{\lambda}\right)\right)^{2}};$$

$$F\left(\beta^{n},\alpha^{n}=\frac{\pi}{2}\right) = \left(1+\varepsilon_{s\phi\phi}\left(\operatorname{ctg}\left(\frac{2\pi\sqrt{\varepsilon_{s\phi\phi}}d}{\lambda}\right)\right)^{2}\right)\left(\frac{\sin\left(0,5k_{o}b\cos\left(\beta^{n}\right)\right)}{0,5k_{o}b\cos\left(\beta^{n}\right)}\right)^{2} \times \frac{\left(\sin\left(\beta^{n}\right)\right)^{2}}{\left(\sin\left(\beta^{n}\right)\right)^{2}+\left(\xi_{1}\left(\beta^{n}\right)\operatorname{ctg}\left(\frac{2\pi\xi_{1}\left(\beta^{n}\right)d}{\lambda}\right)\right)^{2}}\right)$$

При одинаковых амплитудах излучения $J_{n}(n_{1}, n_{2})=1$ справедливо [6]

$$f_{n,\text{Mp}}(\alpha,\beta) = \left\{ \frac{\sin\left(\frac{N_{y}}{2}\psi_{n,y}(\alpha,\beta)\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}\psi_{n,y}(\alpha,\beta)\right)} \frac{\sin\left(\frac{N_{x}}{2}\psi_{n,x}(\alpha,\beta)\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}\psi_{n,x}(\alpha,\beta)\right)} \right\},$$

где фазы $\psi_{nv}(\alpha, \beta)$ и $\psi_{nx}(\alpha, \beta)$ определяются выраже-

$$\psi_{n,y}(\alpha,\beta) = d_{n,y}\left[k_n\cos(\beta)\sin(\beta) + (-1)^{PS-1}k_{n,\Pi}\right]$$

$$\psi_{n,x}(\alpha,\beta) = d_{n,x}\left[k_n\cos(\beta)\cos(\beta) + (-1)^{n-1}k_{n,\Pi}\right].$$

Традиционно рассматривают не само выражение $f_n(\alpha, \alpha)$ β), а модуль $Mf_n(\alpha, \beta) = |f_n(\alpha, \beta)|$. Расположение $(\alpha_{n,n}(n_{n,n}))$ $n_{\text{III,V}}, \beta_{n,\text{III}}(n_{\text{III,V}}, n_{\text{III,V}}))$ объемных главных лепестков $(n_{\text{III,V}}, n_{\text{III,V}})$ n_{max}) диаграммы $Mf_n(\alpha, \beta)$ задается системой уравнений:

$$\begin{cases} \Psi_{n.y}(\alpha_{n.rn},\beta_{n.rn}) = n_{rn.y}(2\pi) \\ \Psi_{n.x}(\alpha_{n.rn},\beta_{n.rn}) = n_{rn.x}(2\pi) \end{cases}$$

Объемным главным лепесткам $(n_{\text{гл.х}}, n_{\text{гл.y}})$ соответствуют плоские главные лепестки в сечениях

1) $\alpha = 45^{\circ}$ (лепестки $\beta_{n.гл.\alpha=45^{\circ}}$ ($n_{rл.x}$), (лепестки $\beta_{n.гл.\alpha=45^{\circ}}$

 $(n_{_{\text{гл.y.}}}));$ 2) $\alpha = 135^{\circ}$ (лепестки $\beta_{_{n.гл.\alpha=1355^{\circ}}}(n_{_{\text{гл.x.}}})$, (лепестки $\beta_{_{n.гл.\alpha=135^{\circ}}}$

Выражения для плоских главных лепестков для действительного диапазона β∈[0°,180°] представлены ниже:

$$\beta_{n.\text{FR},\alpha=45^{\circ}}(n_{\text{FR},x}) = \arccos\left(\sqrt{2} \frac{n_{\text{FR},x}(2\pi) - (-1)^{n-1} k_{n,x} d_{n,x}}{k_n d_{n,x}}\right);$$

$$\beta_{n.\text{FR},\alpha=45^{\circ}}(n_{\text{FR},y}) = \arccos\left(\sqrt{2} \frac{n_{\text{FR},y}(2\pi) - (-1)^{n-1} k_{n,x} d_{n,y}}{k_n d_{n,y}}\right);$$

$$\beta_{n.\text{FR},\alpha=135^{\circ}}(n_{\text{FR},x}) = \arccos\left(-\sqrt{2} \frac{n_{\text{FR},y}(2\pi) - (-1)^{n-1} k_{n,x} d_{n,x}}{k_n d_{n,x}}\right);$$

$$\beta_{n.\text{FR},\alpha=135^{\circ}}(n_{\text{FR},y}) = \arccos\left(\sqrt{2} \frac{n_{\text{FR},y}(2\pi) - (-1)^{n-1} k_{n,x} d_{n,y}}{k_n d_{n,y}}\right).$$

Существенным моментом при проектировании микрополосковой антенны является правильный выбор одного из имеющихся лепестков $(n_{\text{гл.х}}, n_{\text{гл.y}})$ в качестве основного.

Результаты моделирования. Сравнение вариантов реализации

Рассмотрим случай выбора лепестка $(n_{\text{гл.x}}=0, n_{\text{гл.y}}=0)$ в качестве основного. Положение центрального лепестка $(n_{\text{гл.x}}=0, n_{\text{гл.y}}=0)$ определяется системой уравнений:

$$\begin{cases} \Psi_{n,y} \left(\alpha_{n,r\pi}, \beta_{n,r\pi} \right) = 0 \\ \Psi_{n,x} \left(\alpha_{n,r\pi}, \beta_{n,r\pi} \right) = 0 \end{cases}$$

Последнему соответствуют лепестки функции направленности:

$$\beta_{n.r.n.\alpha=45^{\circ}}(n_{r.n.x}=0) = \arccos\left(\sqrt{2} \frac{-(-1)^{n-1} k_{n.n}}{k_n}\right);$$

$$\beta_{n.r.n.\alpha=45^{\circ}}(n_{r.n.y}=0) = \arccos\left(\sqrt{2} \frac{-(-1)^{n-1} k_{n.n}}{k_n}\right);$$

$$\beta_{n.r.n.\alpha=135^{\circ}}(n_{r.n.x}=0) = \arccos\left(-\sqrt{2} \frac{-(-1)^{n-1} k_{n.n}}{k_n}\right);$$

$$\beta_{n.r.n.\alpha=135^{\circ}}(n_{r.n.y}=0) = \arccos\left(\sqrt{2} \frac{-(-1)^{n-1} k_{n.n}}{k_n}\right).$$

Положение центрального объемного главного лепестка не зависит от шагов $d_{n,y}$ и $d_{n,x}$. Лепесток является мнимым (т. е. не находится в диапазоне углов) по причине того, что $k_{n,x} \ge k_n$. Таким образом, лепесток ($n_{rn,x}=0$, $n_{rn,y}=0$) не может быть выбранным в качестве основного.

Приведем результаты моделирования при выборе дифракционного лепестка ($n_{\text{гл.x}}=1$, $n_{\text{гл.y}}=1$) для формирования первого луча с использованием подрешетки n=1, и дифракционного лепестка ($n_{\text{гл.x}}=-1$, $n_{\text{гл.y}}=1$) для создания второго луча с подрешетки n=2, прямая запитка. Параметры антенны и результаты оценки параметров ее излучения для данного случая представлены в табл. 1. $\lambda_0 = c/f_0$, $f_0 = 14.9$ ГГц, $\Delta\beta_{n.\text{гл.}}$, $\Delta\alpha_{n.\text{гл.}} =$ ширина луча по уровню половинной мощности, $G_{ny6n} =$ уровень боковых лепестков. На рис. 2 приведены поверхностные графики ДН подрешеток.

Несмотря на отсутствие других (мешающих) главных лепестков в диапазоне углов $\beta \in [0^\circ, 180^\circ]$, малую ширину лепестка и приемлемый уровень бокового излучения, вследствие малой величины шагов d_{nx} и d_{ny} , на полотне имеется большое число излучателей $N_x = N_y$.

Это усложняет структуру антенны, увеличивает ее стоимость, усложняет систему запитки излучателей микрополосковыми линиями, приводит к возникновению проблем размещения и взаимного влияния излучателей. Такой вариант не рекомендуется.

Рассмотрим выбор лепестка ($n_{\text{гл.x}}=1, n_{\text{гл.y}}=-1$) в качестве основного для подрешетки n=1, выбор лепестка ($n_{\text{гл.x}}=-1, n_{\text{гл.y}}=-1$) в качестве основного для подрешетки n=2, обратная запитка. Сведения об антенне



Рис. 2. Поверхностные графики ДН антенны при $(n_{_{\text{гл.x}}}=1, n_{_{\text{гл.y}}}=1, n=1)$ и $(n_{_{\text{гл.x}}}=-1, n_{_{\text{гл.y}}}=1; n=2)$ соответственно.

ИНФОРМАЦИЯ и КОСМОС №4

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

Таблица 1

$\varepsilon_{9\phi\phi} = 2,79; PS = 1; N_x = N_y = 36$		
Подрешетка $n = 1$	Подрешетка $n = 2$	
$d_{1.x} = d_{1.y} = 0,509\lambda_0$	$\int d_{2.x} = d_{2.y} = 0,506\lambda_0$	
$q_1 = 0,85d_{1,y}$	$\left\{ q_{5}=q_{1} ight\}$	
$q_3 = q_7 + 0, 4d_{1,y}$	$q_7 = 0,75d_{1,y}$	
$\left(\left(n_{\mathrm{fr},x}=1,n_{\mathrm{fr},y}=1\right)\right)$	$\left(\left(n_{\text{гл.}x}=-1,n_{\text{гл.}y}=1\right)\right)$	
$\alpha_{1.n\pi} = 45,00^{\circ}$	$\alpha_{2.\text{FT}} = 135,00^{\circ}$	
β _{1.гл} = 64,81°	$\beta_{2.r\pi} = 64,95^{\circ}$	
$\int \Delta \beta_{1.r\pi} = 3,12^{\circ}$	$\int \Delta \beta_{2.r\pi} = 3,12^{\circ}$	
$\int \Delta \alpha_{1.r\pi} = 6,65^{\circ}$	$\Delta \alpha_{2.r\pi} = 6,69^{\circ}$	
<i>G</i> _{1.убл} = 13,0 дБ	<i>G</i> _{2.убл} = 13,0 дБ	

Таблица 2

$\varepsilon_{2\phi\phi} = 2,79; PS = 2; N_x = N_y = 25$		
Подрешетка $n = 1$	Подрешетка <i>n</i> = 2	
$d_{1.x} = d_{1.y} = 0,732\lambda_0$	$\int d_{2.x} = d_{2.y} = 0,728\lambda_0$	
$q_1 = 0,68d_{1,y}$	$\left\{ q_{5}=q_{1} ight\}$	
$q_3 = q_7 + 0, 4d_{1.y}$	$q_7 = 0,75d_{1.y}$	
$\left(\left(n_{\mathrm{ff},x}=1,n_{\mathrm{ff},y}=-1\right)\right)$	$\left(\left(n_{\text{гл.}x} = -1, n_{\text{гл.}y} = -1 \right) \right)$	
$\alpha_{1.rn} = 135,00^{\circ}$	$\alpha_{2.r\pi} = 45,00^{\circ}$	
$\beta_{1.r\pi} = 64,93^{\circ}$	β _{2.гл} = 64,78°	
$\int \Delta \beta_{1.\Gamma \pi} = 3,13^{\circ}$	$\int \Delta \beta_{2.r\pi} = 3,13^{\circ}$	
$\Delta \alpha_{1,r\pi} = 6,63^{\circ}$	$\Delta \alpha_{2.r\pi} = 6,70^{\circ}$	
<i>G</i> _{1.убл} = 12,9 дБ	<i>G</i> _{2.убл} = 12,9 дБ	

для данного случая содержатся в табл. 2. На рис. 3 приведены поверхностные графики ДН подрешеток. Этот случай лучше предыдущего.

На полотне имеется меньшее количество излучателей. Другие (мешающие) главные лепестки в диапазоне углов $\beta \in [0^\circ, 180^\circ]$ отсутствуют. Приемлемые ширина основного лепестка и уровень бокового излучения.

Незначительным недостатком данного случая является необходимость обратной запитки излучателей, что ведет к усложнению структуры антенны и уменьшению эффективной площади антенны за счет увеличения параметров смещения.

Покажем, что выбор лепестка $(n_{\text{TLX}} = 2, n_{\text{TR},y} = 2)$ в качестве основного для подрешетки n=1, $(n_{\text{TL},x} = -2, n_{\text{TR},y} = 2)$ в качестве основного для подрешетки n=2, прямая запитка, уже не является корректным. Сведения об антенне для данного случая содержатся в табл. 3. На рис. 4 – поверхностные графики ДН подрешеток.

Число излучателей на полотне меньше, чем в двух предыдущих случаях. Приемлемая ширина основного лепестка, но недопустим такой высокий уровень бокового излучения, поскольку наблюдаются три мешающих главных лепестка, максимумы которых лишь в 3-4 раза меньше уровня основного лепестка, что ощутимо больше, чем уровень бокового излучения для других вариантов исполнения. Указанные мешающие лепестки будут негативно влиять на работу системы ДИСС.

Использование дифракционных лепестков с номерами более высокого порядка характеризуется еще большим количеством сильных мешающих боковых лепестков. Другой вариант исполнения подобной антенны, конструктивно более сложный, но устойчивый к возможному уходу максимумов ДН антенны при температурных изменениях, приведен в [7].

Выводы

Предложен вариант реализации двухлучевой микрополосковой антенной решетки. Ее характеристики направленности зависят от выбора порядка дифракционных максимумов функции направленности для каждой из двух подрешеток, размещаемых на раскрыве. При таком подходе меняются и расстояния между излучателями в соответствии с необходимыми для каждой подрешетки фазовыми распределениями, которые формируются за счет набега фаз в микрополосковых линиях между излучателями. Путем математического моделирования показано, что при разработке антенны следует ограничиваться ближними дифракционными лепестками, гарантирующими такое максимально возможное расстояние между излучателями, которое позволяет удовлетворить требованию к уровню бокового излучения.

Литература

1. Дмитриев, С. П. Задачи навигации и управления при стабилизации судна на траектории / С.П. Дмитриев, А.Е. Пелевин. – Санкт-Петербург : ЦНИИ «Электроприбор», 2002. – 160 с.

2. Панченко, Б. А. Микрополосковые антенны / Б.А. Панченко, Е.И. Нефедов. – Москва : Радио и связь, 1986. – 143 с.

Таблица 3

$\varepsilon_{9\phi\phi} = 2,79; PS = 1; N_x = N_y = 18$	
Подрешетка <i>n</i> = 1	Подрешетка n = 2
$d_{1.x} = d_{1.y} = 1,018\lambda_0$	$d_{2.x} = d_{2.y} = 1,012\lambda_0$
$q_1 = 0,52d_{1,y}$	$q_5 = q_1$
$q_3 = q_7 + 0,47d_{1,y}$	$q_7 = 0,6d_{1,y}$
$\left(\left(n_{\mathrm{fr},x}=2,n_{\mathrm{fr},y}=2\right)\right)$	$\left(\left(n_{\text{гл.}x} = -2, n_{\text{гл.}y} = -2 \right) \right)$
$\alpha_{1.r.n} = 45,00^{\circ}$	$\alpha_{2.r\pi} = 135,00^{\circ}$
$\beta_{1.r\pi} = 64,81^{\circ}$	$\beta_{2.r\pi} = 64,95^{\circ}$
$\int \Delta \beta_{1.r\pi} = 3,12^{\circ}$	$\int \Delta \beta_{2.r\pi} = 3,12^{\circ}$
$\int \Delta \alpha_{1.rn} = 6,66^{\circ}$	$\Delta \alpha_{2.r\pi} = 6,69^{\circ}$
<i>G</i> _{1.убл} = 12,8 дБ	<i>G</i> _{2.убл} = 12,8 дБ

ИНФОРМАЦИЯ и КОСМОС №4

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ



Рис. 3. Поверхностные графики ДН антенны при (n_{гл.х}=1, n_{гл.y}=-1, n=1) и (n_{гл.x}=-1, n_{гл.y}=-1; n=2) соответственно



Рис. 4. Поверхностные графики ДН антенны при (n_{гл.x}=1, n_{гл.y}=-1, n=1) и (n_{гл.x}=-1, n_{гл.y}=-1; n=2) соответственно

Крячко А.Ф., Рыжиков М.Б., Новикова Ю.А. Анализ характеристик излучения двухлучевой плоской ...

3. Лось, В. Ф. Микрополосковые и диэлектрические резонаторные антенны. САПР-модели: методы математического регулирования / В.Ф. Лось. – Москва : ИПРЖР, 2002. – 96 с.

4. RO3000® Series Circuit Materials RO3003[™], RO3006[™], RO3010[™] and RO3035[™] High Frequency Laminates / [Электронный pecypc]. – URL: https://www.rezonit.ru/upload/ spetsifikatsii/Rogers_RO3000.pdf?ysclid= l7aekq 9ff6190950464 (дата обращения: 26.07.2020).

5. Крячко, А. Ф. Сравнение антенны со ступенчатым излучающим полотном и двулучевой волноводно-щелевой антенны / А.Ф. Крячко, М.Б. Рыжиков, Ю.А Новикова // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2018. – Т. 23, № 7. – С. 30–36.

6. Хансен, Р. С. Фазированные антенные решетки / Р.С. Хансен. – Москва : Техносфера, 2012. – 566 с.

7. Крячко, А. Ф. Особенности реализации системы питания и фазирования ступенчатой антенны радиодоплеровского лага / А.Ф. Крячко, М.Б. Рыжиков, Ю.А Новикова // Информация и Космос. – 2022. – № 2. – С. 27–34.

ИНФОРМАЦИЯ и КОСМОС №4