

В. М. ГУСАКОВ, А. В. МИХАЙЛОВСКИЙ, С. Е. ШАЛДАЕВ, В. М. ШКИЛЬ

МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ЛОГОПЕРИОДИЧЕСКИХ И КОНИЧЕСКИХ ЛОГОСПИРАЛЬНЫХ АНТЕНН ДЛЯ ПАССИВНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ

Представлены разработанные на основе методов теории частотно-независимых антенн методика и алгоритмы расчета радиолокационных характеристик логопериодических и конических логоспиральных антенн, используемых в пассивных радиолокационных отражателях для имитации малоразмерных целей.

Ключевые слова: логопериодическая антенна, логоспиральная антенна, радиолокационные отражатели, радиолокационные цели.

Введение. Перспективным направлением исследований в области синтеза радиолокационных отражателей является их создание на основе турникетных логопериодических антенн (ЛПА) и конических логоспиральных антенн (ЛСА), используемых для имитации малоразмерных целей [1]. Применение таких антенн целесообразно в случае, когда условия работы требуют частотной независимости их радиолокационных характеристик одновременно в сантиметровом и дециметровом диапазонах длин волн. Такие структуры имеют, в отличие от существующих аналогов [2, 3], более широкий диапазон частот. Кроме того, их отличительной особенностью является возможность выполнения в виде разворачиваемых (раскрываемых) конструкций, первоначально находящихся в компактном (сложенном) виде (см., например, рис. 1, а).

Неизменность характеристик данных антенн в широком диапазоне частот объясняется одним из положений теории излучения, в котором утверждается, что электрические характеристики излучающей системы определяются не только ее конфигурацией, но и соотношением ее размеров и длины волны. Для антенн данного типа отношение их размеров к длине волны не зависит от частоты внутри рабочего диапазона. Их входное сопротивление и диаграмма направленности (ДН) остаются неизменными при изменении частоты. Рабочий диапазон частот относительно длинных волн ограничен допустимыми размерами антенны, а относительно коротких — возможностью изготовления коротковолновых элементов антенны с высокой точностью и реализации плавного перехода от питающей линии к антенне [4], что обусловлено установлением режима бегущей волны в излучающей системе.

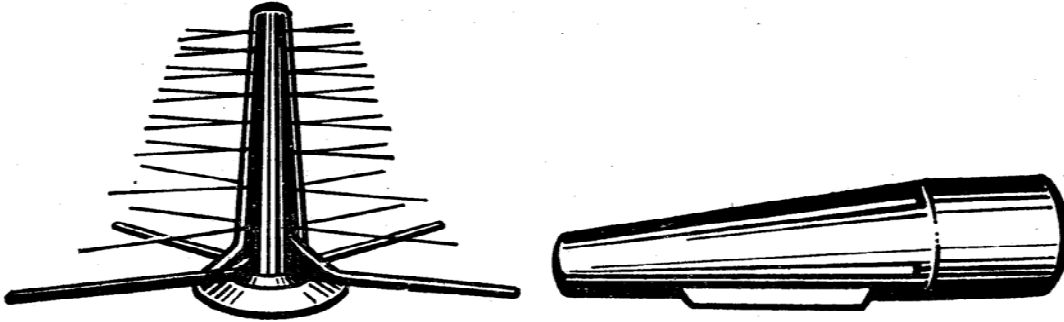
Таким образом, расчет и проектирование логопериодических и логоспиральных антенн, используемых в пассивных радиолокационных отражателях для имитации малоразмерных целей, неразрывно связаны с определением геометрических параметров антенн и обоснованием методов расчета их радиолокационных характеристик в широком диапазоне длин волн, что и является предметом исследования в настоящей статье.

Методика расчета радиолокационных характеристик логопериодической антенны. Разработка и проектирование пассивных радиолокационных отражателей основаны на использовании явления вторичного излучения электромагнитных волн от отражающих поверхностей. В качестве основной характеристики будем рассматривать эффективную площадь рассеяния (ЭПР) антенны — один из информативных признаков селекции радиолокационных целей, позволяющий обеспечить РЛС распознавание (в целях идентификации или классификации) ракетно-космических объектов. Рассмотрим также диаграмму обратного рассеяния — зависимость ЭПР от пространственных сферических углов облучения и частоты зондирующего сигнала при однопозиционной локации антенны.

Методика базируется на теории антенн [4, 5] и позволяет по диаграмме направленности рассчитать ЭПР антенны.

Образец антенны и ее геометрия представлены на рис. 1, а, б соответственно.

а)



б)

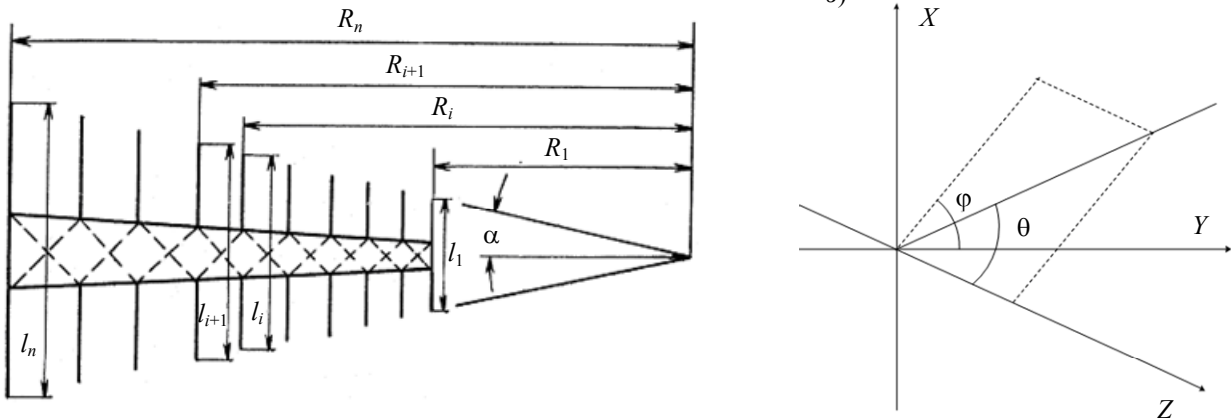


Рис. 1

Угол α при вершине антенны, определяющий размер решетки, выбирается из диапазона $10 \dots 20^\circ$. Безразмерный период решетки — коэффициент подобия τ — определяется выражением

$$\tau = l_{i-1}/l_i, \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

где l_i — длина i -го плеча вибратора, n — количество вибраторов.

Входное сопротивление антенны определяется в основном волновым сопротивлением фидера и слабо зависит от частоты. Предполагается, что пассивная ЛПА работает в режиме короткого замыкания. Поэтому диаграмма направленности антенны будет определяться амплитудно-фазовым распределением в режиме короткого замыкания, а взаимным влиянием вибраторов можно пренебречь. Известно, что диаграмма ЭПР в произвольном направлении в сферической системе координат определяется соотношением

$$\sigma(\varphi, \theta) = D(\varphi, \theta) \frac{D_{\max} \lambda^2}{4\pi}, \quad (1)$$

где θ — угол между осью антенны и направлением на цель, а φ — угол, определяющий направление на цель в плоскости, перпендикулярной оси антенны (см. рис. 1, в); D_{\max} — коэффициент направленного действия (КНД) антенны в направлении главного максимума ДН:

$$D_{\max} = \frac{4\pi}{\int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} F^2(\varphi, \theta) \sin \theta \cdot d\varphi d\theta}; \quad (2)$$

$D(\varphi, \theta)$ — КНД переизлученного поля в произвольном направлении:

$$D(\varphi, \theta) = D_{\max} F^2(\varphi, \theta); \quad (3)$$

λ — длина волны; $F(\varphi, \theta)$ — диаграмма направленности:

$$F(\varphi, \theta) = \frac{1}{2} \sqrt{|F_1(\varphi, \theta)|^2 + |F_2(\varphi, \theta)|^2} \cdot \left| \sum_{k=-m}^q a_{n+k} \exp \left\{ -i \left[\frac{\pi}{2} \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} \cdot (1 - \tau^k)(1 + \cos \theta) \right] + ik\pi \right\} \right|, \quad (4)$$

где

$$F_1(\varphi, \theta) = \frac{\cos \left(\frac{\pi}{2} \sin \theta \cos \varphi \right)}{\sqrt{1 - \sin^2 \theta \cos^2 \varphi}}, \quad F_2(\varphi, \theta) = i \frac{\cos \left(\frac{\pi}{2} \sin \theta \cos \varphi \right)}{\sqrt{1 - \sin^2 \theta \cos^2 \varphi}}.$$

В сумме выражения (4) учитываются поля, создаваемые резонирующими вибраторами, а также ближайшими более короткими и длинными вибраторами; нумерация вибраторов k производится от резонирующего полуволнового ($l_k \approx 0,47\lambda$). Количество коротких вибраторов выбирается равным $m=0\dots3$, длинных, как правило, — равным $q=1$. Выбор весовых коэффициентов a_{n+k} осуществляется по методике, изложенной в работе [5, с. 74].

С учетом представленной выше методики приведем алгоритм расчета ЭПР σ логопериодической антенны при следующих исходных данных: $f \in (f_{\min} \dots f_{\max})$ — диапазон частот; L — длина антенны; d_{\max} — максимальный диаметр раскрыва антенны.

Алгоритм 1.

1. Выбираем по методике, изложенной в работах [4, 5], значения угла α и коэффициента подобия τ исходя из оптимальной конструкции ЛПА.

2. Вычисляем минимальную и максимальную длину плеч вибраторов:

$$l_1 = l_{\min} = \frac{\lambda_{\min}}{4}, \quad l_n = l_{\max} = \frac{\lambda_{\max}}{4}.$$

Путем сравнения значений l_{\max} и d_{\max} уточняем параметры α , τ и λ_{\max} , при которых выполняется условие $l_{\max} \leq d_{\max}$.

3. Вычисляем расстояние до первого вибратора (см. рис. 1, б):

$$R_1 = l_{\min} / \operatorname{ctg}(\alpha/2).$$

4. Вычисляем количество n вибраторов по формуле

$$\lambda_{\max} = \lambda_1 / \tau^{n-1}.$$

5. Определяем длины плеч всех вибраторов и расстояния между ними:

$$l_i = \frac{l_1}{\tau^{i-1}}; \quad R_i = \frac{l_1}{\tau^{i-1}}, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

6. Сравниваем расстояние R_n с заданной длиной L антенны и уточняем значение λ_{\max} , при котором возможно реализовать заданные геометрические параметры антенны.

7. Для каждой частоты или длины волны определяем значение σ в зависимости от пространственных координат (1).

Расчет радиолокационных характеристик логоспиральной антенны. Применим изложенную выше методику для расчета ЭПР конической логоспиральной антенны, используемой в пассивных радиолокационных отражателях, образцы которых представлены на рис. 2, а; геометрия антенны показана на рис. 2, б. Основными параметрами рассматриваемой структуры являются: θ_0 — угол при вершине конуса, α — угол намотки спирали, d_{\max} — диаметр основания конуса, d_{\min} — диаметр при вершине конуса, угол $\varphi=0\dots 2\pi$ отсчитывается от оси OX к оси OY , а угол $\theta=0\dots\pi$ — от оси OZ .

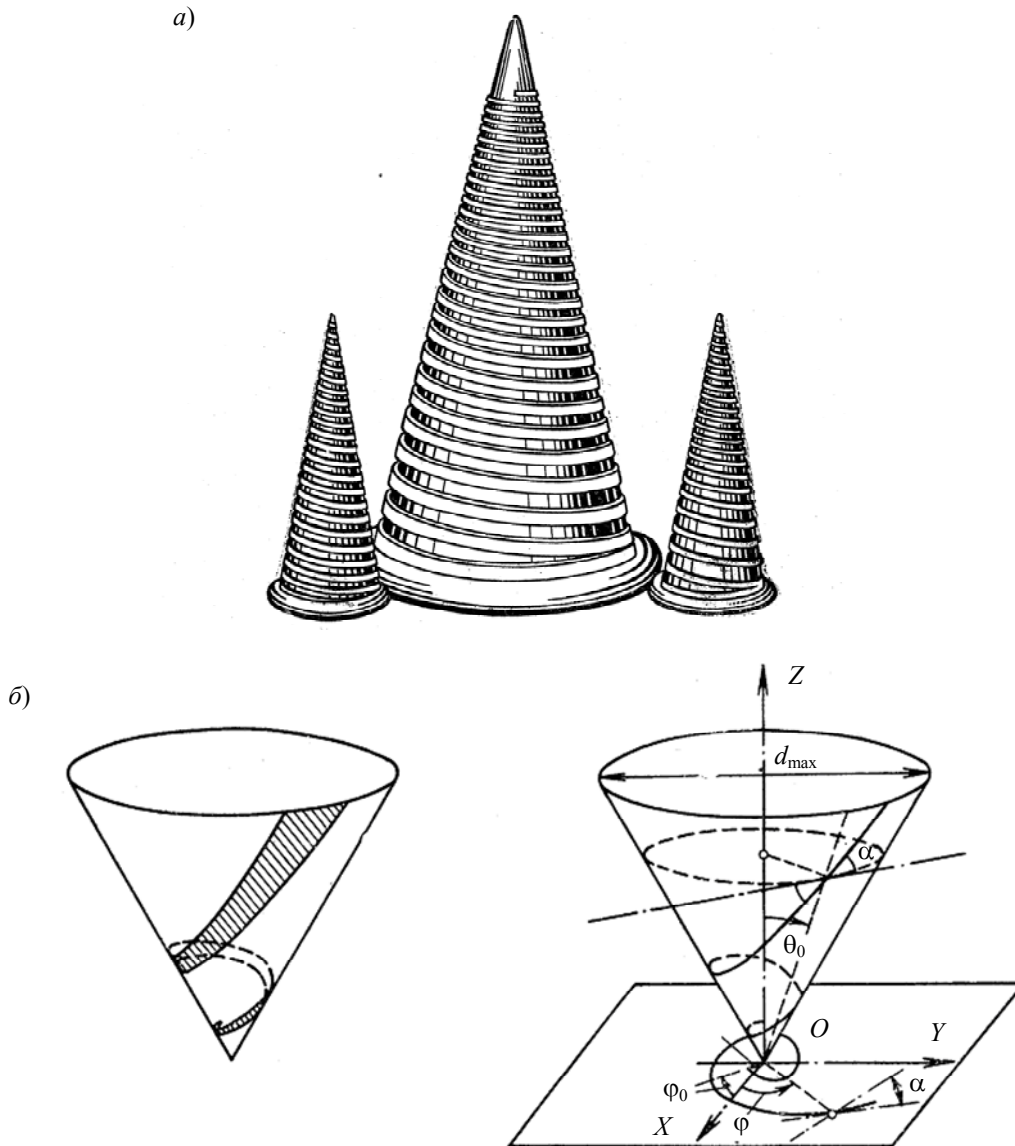


Рис. 2

Металлические ветви антенны монтируются на диэлектрическом опорном конусе. В качестве диэлектрика может быть использовано теплозащитное покрытие с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 1\dots 3$. Диаграмма направленности такой структуры зависит от угла θ_0 и в меньшей степени от угла α . При этом необходимо учитывать, что для углов $\theta_0 \leq 15^\circ$ основное переотражение поля происходит в направлении вершины конуса.

С учетом изложенного приведем алгоритм расчета ЭПР логоспиральной антенны при исходных параметрах, заданных для алгоритма 1.

Алгоритм 2.

1. По заданному диапазону длин волн $\lambda_{\min} \dots \lambda_{\max}$ определяем минимальный диаметр при вершине конуса: $d_{\min} = \lambda_{\min} / 2$.

2. Исходя из требуемых значений КНД или ширины ДН антенны по графикам, приведенным в работе [5, с. 63], выбираем предельные значения углов θ_0 и α :

$$\theta_0 \approx 10 \dots 30^\circ, \quad \alpha \approx 5 \dots 25^\circ.$$

В рассматриваемом случае целесообразно выбрать $\theta_0 \approx 10 \dots 15^\circ$.

3. Для усиления переизлучающих свойств структуры выбираем диаметр основания конуса: $d_{\max} \geq \lambda_{\max} / 2$.

4. Вычисляем нормированную ДН антенны по формуле [6, с. 64]

$$F(\varphi, \theta) = \frac{f(\varphi, \theta)}{f_{\max}(\varphi, \theta)},$$

где

$$f(\varphi, \theta) = 1,25 \cos \left(\frac{\cos \alpha \sin \theta}{1 - \sin \alpha \cos \theta_0 \cos \theta} \right) \ln \left(2,25 \frac{1 - \sin \alpha \cos \theta_0 \cos \theta}{1 + \sin \alpha \cos \theta_0} \right).$$

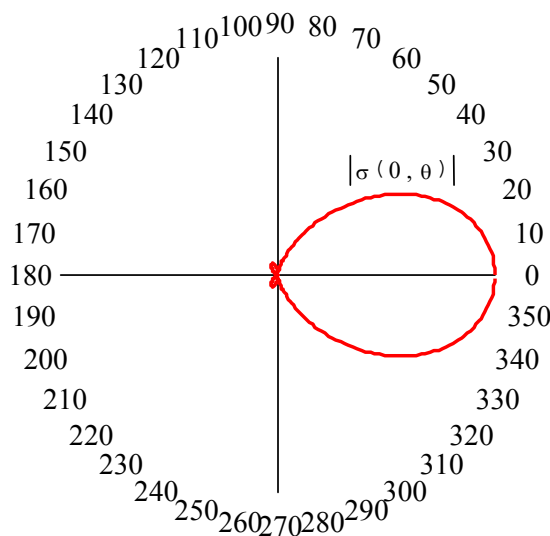
5. Вычисляем КНД в направлении главного максимума с учетом того, что ДН в экваториальной плоскости изотропна:

$$D_{\max} = \frac{2}{\int_{\theta=0}^{\pi} F^2(\theta) \sin \theta \cdot d\theta}.$$

6. Используя формулы (1)–(3), определяем ЭПР σ как функцию угла θ и длины волны.

Результаты расчетов. Примеры рассчитанных зависимостей изменения ЭПР логопериодических и логоспиральных антенн при изменении угла θ в определенном диапазоне для случая, когда вектор распространения электромагнитных волн совпадает с продольной осью антенн, приведены на рис. 3, 4 и 5, 6 соответственно и в сопутствующих таблицах.

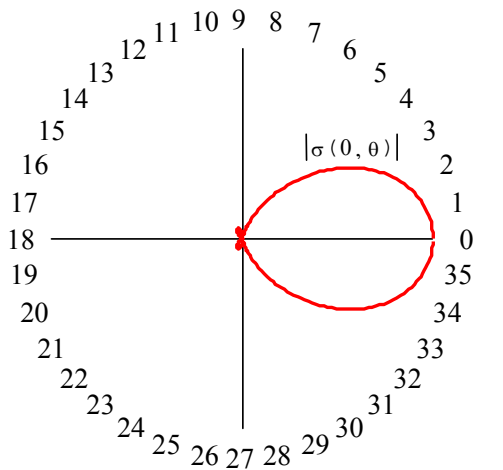
$$\lambda = 0,03 \text{ м}, \quad \alpha/2 = 20^\circ, \quad \tau = 0,75, \quad R_n = 0,59 \text{ м}$$



θ, \dots°	$\sigma(\varphi=0, \theta), \text{ м}^2 \cdot 10^{-4}$	θ, \dots°	$\sigma(\varphi=0, \theta), \text{ м}^2 \cdot 10^{-4}$
0	4,741	33	3,25
3	4,728	36	2,994
6	4,689	39	2,728
9	4,624	42	2,456
12	4,534	45	2,183
15	4,419	48	1,912
18	4,278	51	1,648
21	4,114	54	1,395
24	3,927	57	1,158
27	3,72	60	0,939
30	3,493		

Рис. 3

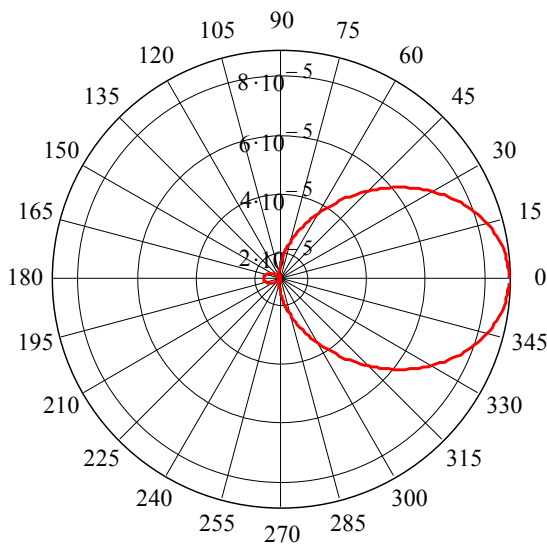
$\lambda = 0,7 \text{ м}, \alpha/2 = 20^\circ, \tau = 0,75, R_n = 0,59 \text{ м}$



θ, \dots°	$\sigma(\varphi=0, \theta), \text{ м}^2$	θ, \dots°	$\sigma(\varphi=0, \theta), \text{ м}^2$
0	0,258	33	0,177
3	0,257	36	0,163
6	0,255	39	0,149
9	0,252	42	0,134
12	0,247	45	0,119
15	0,241	48	0,104
18	0,233	51	0,09
21	0,224	54	0,076
24	0,214	57	0,063
27	0,203	60	0,051
30	0,19		

Рис. 4

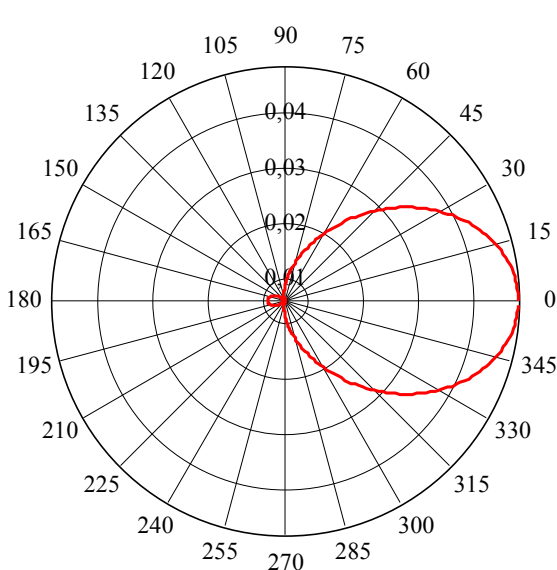
$\lambda = 0,03 \text{ м}, \alpha = 15^\circ, \theta_0 = 30^\circ, L = 1,334 \text{ м}$



θ, \dots°	$\sigma(\varphi=0, \theta), \text{ м}^2 \cdot 10^{-5}$	θ, \dots°	$\sigma(\varphi=0, \theta), \text{ м}^2 \cdot 10^{-5}$
0	8,852	33	6,702
3	8,831	36	6,362
6	8,77	39	6,015
9	8,669	42	5,664
12	8,529	45	5,312
15	8,353	48	4,965
18	8,143	51	4,623
21	7,902	54	4,292
24	7,634	57	3,973
27	7,342	60	3,668
30	7,03		

Рис. 5

$\lambda = 0,7 \text{ м}, \alpha = 15^\circ, \theta_0 = 30^\circ, L = 1,334 \text{ м}$



θ, \dots°	$\sigma(\varphi=0, \theta), \text{ м}^2$	θ, \dots°	$\sigma(\varphi=0, \theta), \text{ м}^2$
0	0,048	33	0,036
3	0,048	36	0,035
6	0,048	39	0,033
9	0,047	42	0,031
12	0,046	45	0,029
15	0,045	48	0,027
18	0,044	51	0,025
21	0,043	54	0,023
24	0,042	57	0,022
27	0,04	60	0,02
30	0,038		

Рис. 6

Анализ представленных зависимостей показал, что диаграмма обратного рассеяния в силу симметрии структур антенн от угла φ не зависит. При этом значения σ для ЛСА в среднем на порядок ниже, чем для ЛПА.

Таким образом, путем выбора геометрических параметров антенн можно гибко и в широком диапазоне длин волн управлять характеристиками рассеянного поля и обеспечить их подобие по ЭПР реальным малоразмерным целям.

Используя представленные в статье методику и алгоритмы расчета радиолокационных характеристик логопериодических и логоспиральных антенн можно рассчитать диаграмму обратного рассеяния и эффективную площадь рассеяния антенн при произвольных направлениях распространения падающей волны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Великанов Д. В. и др. Радиотехнические системы в ракетной технике. М.: Изд-во МО СССР, 1974.
2. Масалов С. А., Рыжак А. В., Сухаревский О. И., Шкиль В. М. Физические основы диапазонных технологий типа „Стелс“. СПб: ВИКУ им. А. Ф. Можайского, 1999.
3. Котляр А. Ф., Шалдаев С. Е., Шкиль В. М. Дифракция электромагнитных волн на неидеально проводящем эшелетте с ламелями // Антенны. 2005. Вып. 4 (95). С. 51—55.
4. Жук М. С., Молочков Ю. Б. Проектирование антенно-фидерных устройств. М.: Энергия, 1966.
5. Грибов А. М., Москалёв В. М., Невзоров В. И. Расчет и проектирование антенн. СПб: ВИКА им. А. Ф. Можайского, 1996.
6. Алексеев А. Г., Штагер Е. А., Козырев С. В. Физические основы технологии „Stealth“, СПб: ВИКУ им. А. Ф. Можайского, 1998.

Сведения об авторах

Виктор Михайлович Гусаков

— адъюнкт; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра антенно-фидерных, передающих устройств и средств СЕВ, Санкт-Петербург

Алексей Владимирович Михайловский

— Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра комплексов и средств информационной борьбы, Санкт-Петербург; инженер; E-mail: a-mik@yandex.ru

Сергей Евгеньевич Шалдаев

— канд. техн. наук; Военный институт (НИ) Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург

Виктор Михайлович Шкиль

— д-р техн. наук, профессор; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра антенно-фидерных, передающих устройств и средств СЕВ, Санкт-Петербург

Рекомендована кафедрой
антенно-фидерных, передающих
устройств и средств СЕВ

Поступила в редакцию
21.04.10 г.