

УДК 621.396.67

В. В. Никитин, А. Д. Французов  
ООО «Научно-производственное предприятие  
"Цифровые радиотехнические системы"»  
Шкиперский проток, д.14, к.1, Санкт-Петербург, 199106, Россия

## Синтез конструкции антенной решетки

**Аннотация.** Впервые поставлена и решена задача синтеза конструкции линейной антенны, состоящей из антенной решетки (АР) и делителя мощности (ДМ). Методом парциальных диаграмм направленности (ДН) синтезированы вертикальные всенаправленные в азимутальной плоскости АР с косекансной формой ДН в вертикальной плоскости. ДМ сигнала типа "дерево" сформирован на базе делителей на 2 направления. Предложен итерационный процесс формирования оптимального делителя с учетом взаимного влияния излучателей и ДМ на базе матриц рассеяния. Результаты синтеза показывают быструю сходимость процесса при оптимальных полученных параметрах системы АР-ДМ.

**Ключевые слова:** синтез линейных антенных решеток, косекансная диаграмма направленности, делитель сигнала, итерационный процесс формирования делителя, матрицы рассеяния

**Для цитирования:** Никитин В. В., Французов А. Д. Синтез конструкции антенной решетки // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2018. № 1. С. 38–42.

V. V. Nikitin, A. D. Frantsuzov  
LLC «RPE "Digital Radio Equipment Systems"»  
14/1, Shkipersky Canal, 199106, St. Petersburg, Russia

### Antenna Array Construction Synthesis

**Abstract.** The problem of linear antenna construction synthesis is first formulated and solved. Linear antenna consists of antenna array (AR) and power divider (PD). Linear omnidirectional AR with cosecant pattern is synthesized using partial-beam method. Beam-forming scheme for this antenna is based on two directional unequal splitters. The article proposes iterative method considering AR and beam-forming scheme mutual effect in terms of scattering matrix. Synthesis results demonstrate rapid convergence of the process and provide optimal pattern.

**Key words:** Linear Antenna Array Synthesis, Cosecant Pattern, Beam-Forming Scheme, Iterative Process Beam-Forming Scheme Synthesis, Scattering Matrix

**For citation:** Nikitin V. V., Frantsuzov A. D. Antenna Array Construction Synthesis. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossii. Radioelektronika* [Journal of the Russian Universities. Radioelectronics]. 2018, no. 1, pp. 38–42. (In Russian)

**Введение.** Антенны с косекансной диаграммой направленности (ДН) широко распространены в системах радионавигации самолетов. Метод парциальных ДН [1], [2] позволяет синтезировать ДН с любой наперед заданной точностью.

Для синтеза конструкции линейной антенной решетки (АР) необходимо синтезировать как собственно ее конструкцию, так и делитель мощности (ДМ). В настоящей статье впервые поставлена и решена задача синтеза конструкции линейной антенны, состоящей из АР и ДМ.

**Постановка задачи.** Для реализации оптимальной конструкции линейной вертикальной антенны целесообразно применить всенаправленную антенную систему [3], состоящую из шестигранной полой колонны 1, двух плоских экранов 2, расположенных вдоль всей колонны, и 12

сдвоенных конформных излучателей 3 (рис. 1). Количество излучателей выбрано исходя из оптимальной длины антенны [2].

Общая ширина экранов, разделяющих сдвоенные излучатели, составляет  $W = 0.44\lambda$ , где  $\lambda$  – средняя длина волны рабочего диапазона. Расстояние между плоскими гранями сдвоенных конформных излучателей  $b = 0.38\lambda$ . Шаг излучателей вдоль колонны  $S = 0.56\lambda$ .

На рис. 2 показаны косекансные ДН в вертикальной плоскости: заданная  $F_{\text{зад}}(\theta)$ , синтезированная на 12 излучателях  $F_c(\theta)$  и реализованная на 12 выбранных излучателях АР  $F(\theta)$ , где  $\theta$  – текущий угол отсчета, отсчитываемый от вертикали.

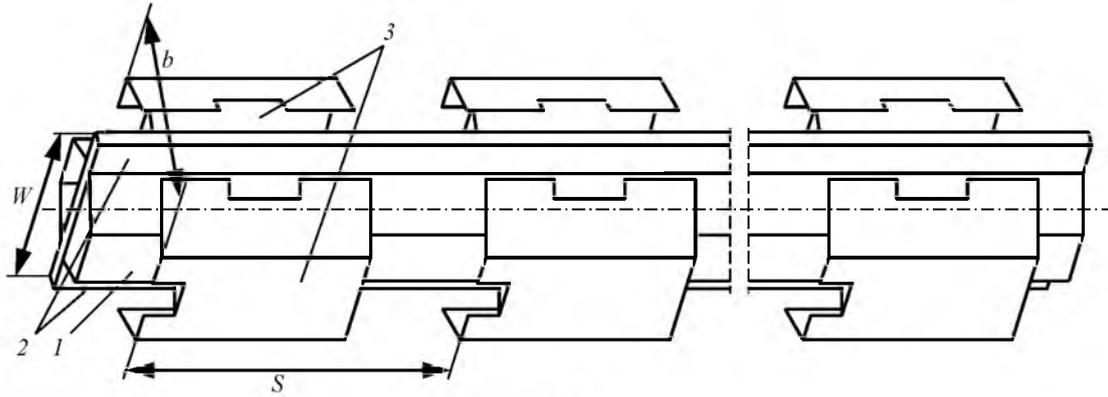


Рис. 1

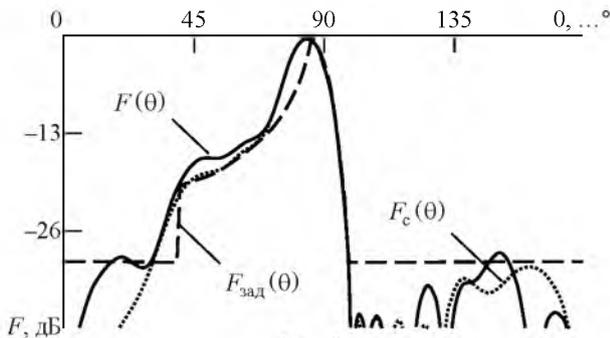


Рис. 2

Параметры синтезированной и реализованной ДН приведены в табл. 1, где  $D_m$  – коэффициент направленного действия (КНД);  $2\theta_{0,5}$  – ширина главного лепестка на уровне половинной мощности;  $F_{\Sigma}(90^\circ)$  – уровень ДН вдоль Земли;  $S(-6 \text{ дБ})$  – крутизна ДН в направлении Земли на уровне  $-6 \text{ дБ}$ ;  $q_{\text{бок}}$  – максимальный уровень боковых лепестков в направлении Земли. Как видно из табл. 1, выбранная модель АР позволяет с хорошей точностью реализовать синтезированную ДН.

Таблица 1

ДН	$D_m$ , дБ	$2\theta_{0,5}$ , ...°	$F_{\Sigma}(90^\circ)$ , дБ	$S(-6 \text{ дБ})$ , дБ/...°	$q_{\text{бок}}$ , дБ
$F_c$	9.58	11.39	-3.35	1.73	30.7
$F$	9.55	11.40	-3.52	1.65	28.8

Синтезированное амплитудно-фазовое распределение (АФР) токов в излучателях приведено в табл. 2, где  $n$  – номер сдвоенного конформного излучателя, считая сверху;  $I_n/I_{\text{max}}$  – нормированное значение амплитуды тока возбуждения излучателя;  $\psi_n$  – фаза тока возбуждения.

Таблица 2

$n$	$I_n/I_{\text{max}}$	$\psi_n, \dots^\circ$	$n$	$I_n/I_{\text{max}}$	$\psi_n, \dots^\circ$
1, 12	0.093	-94.5, 94.5	4, 9	0.468	-52.7, 52.7
2, 11	0.159	-86.6, 86.6	5, 8	0.578	-45.0, 45.0
3, 10	0.308	-73.6, 73.6	6, 7	1.0	-22.9, 22.9

Для формирования синтезированного амплитудно-фазового распределения, приведенного в табл. 2, конструируется ДМ.

Делитель сигнала, размещаемый между двумя плоскими экранами 2 (рис. 1), формируется по симметричной полосковой схеме типа "дерево" (рис. 3). Делитель состоит из 11 согласованных разветвителей с неравным делением сигнала. Для деления сигнала на 2 парных конформных излучателя в каждом выходе делителя на 12 включается согласованный тройник с равным делением мощности. В принятой схеме деления коэффициенты деления по мощности тройников соответствуют следующему ряду, считая от первого (двенадцатого) к шестому (седьмому) излучателю: 1/2.92; 1/2.76; 1/1.69; 1.04/1; 1/1.46. Центральный тройник делит сигнал поровну.

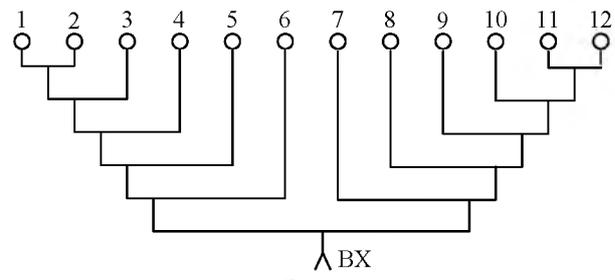


Рис. 3

Указанные коэффициенты деления мощности в делителях на 2 направления не учитывают взаимного влияния излучателей, а также взаимодействие между излучателями и схемой ДМ. В настоящей статье впервые поставлена и решена задача синтеза оптимального ДМ для выбранной оптимальной АР.

**Формулировка метода оптимизации ДМ.** На рис. 4 показана схема подключения  $N$  излучателей, формирующих линейную АР, к делителю сигнала на  $N$  выходов.

На схеме условно показаны напряжения падающих и отраженных волн на  $n$ -м входе АР и ДМ. Стрелками показано направление распро-

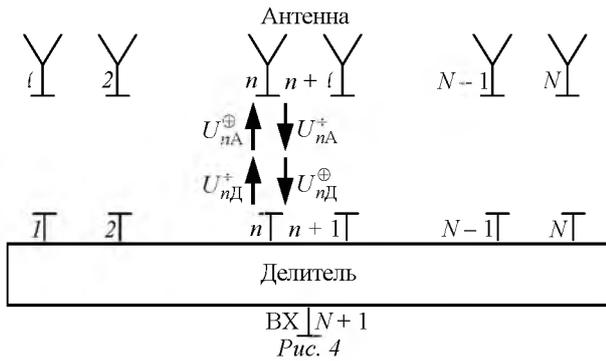


Рис. 4

странения волн. Волна  $U_{nA}^{\oplus}$  падает на вход  $n$ -го излучателя, а волна  $U_{nA}^{\oplus}$  отражается от его входа. На  $n$ -м входе ДМ, присоединенном к  $n$ -му входу АР, также формируются две волны: падающая –  $U_{nD}^{\oplus}$  и отраженная  $U_{nD}^{\oplus}$ . Нетрудно понять, что отраженная от АР волна равна по амплитуде и по фазе волне, падающей на ДМ, а падающая на АР волна равна волне, отраженной от ДМ.

Если излучатели идеально согласованы и коэффициенты связи между излучателями равны нулю, присоединение АР к ДМ не изменяет АФР антенны. При этом АФР токов в АР составляет  $I_{nA} = (U_{nA}^{\oplus} / R_A)$ , где  $R_A$  – входное сопротивление излучателя, и формируется синтезированная ДН антенны.

В реальном случае согласование излучателей неидеально и существует связь между соседними излучателями АР. В результате при подключении АР к делителю формируются отраженные от входов АР волны с напряжением  $U_{nA}^{\oplus}$ . Эти волны, попадая на выходы ДМ, в свою очередь формируют дополнительные волны, падающие на выходы ДМ  $U_{nD}^{\oplus}$  доп. Дополнительные волны, суммируясь с основными волнами  $U_{nD}^{\oplus}$  и затем отражаясь от выходов делителя, создают на входах АР новое АФР, отличное от синтезированного.

Возможность возбудить на входах АР синтезированное АФР возникает, если первоначально на выходах ДМ формировать синтезированное АФР за вычетом дополнительных волн  $U_{nD}^{\oplus}$  доп. Сложность заключается в том, что при формировании ДМ на новое (разностное) АФР происходит изменение первичных падающих волн  $U_{nD}^{\oplus}$ , а следовательно, и волн, отраженных от входов АР  $U_{nA}^{\oplus}$ .

**Алгоритм оптимизации АФР.** Можно предложить следующий итерационный процесс:

1. Синтезируется заданное АФР  $\langle U_{nA}^{\oplus} \rangle_{\text{зад}}$  (в пределах статьи угловые скобки  $\langle \cdot \rangle$  обозначают вектор-столбец, составленный из элементов, указанных в скобках).

2. Определяется матрица рассеяния АР [4]  $[S_{nm}]_{\text{АР}}$ .

3. Вычисляется вектор-столбец отраженных от АР волн  $\langle U_{nA}^{\oplus} \rangle = [S_{nm}]_{\text{АР}} \langle U_{nA}^{\oplus} \rangle_{\text{зад}}$ .

4. Синтезируется ДМ, формирующий АФР  $\langle U_{nA}^{\oplus} \rangle_{\text{зад}}$ .

5. ДМ нагружается на входе  $N+1$  на согласованную нагрузку. На входы  $1 \dots N$  подаются напряжения в соответствии с определенным в п. 3 вектором-столбцом отраженных от АР волн  $\langle U_{nA}^{\oplus} \rangle$ . Определяется вектор-столбец дополнительных волн, падающих на входы АР:  $\langle U_{nD}^{\oplus} \rangle_{\text{доп}} = \langle U_{nA}^{\oplus} \rangle_{\text{доп}}$ .

6. Вычисляется новое АФР

$$\langle U_{nA}^{\oplus} \rangle_{\text{нов}} = \langle U_{nA}^{\oplus} \rangle_{\text{зад}} - \langle U_{nA}^{\oplus} \rangle_{\text{доп}}$$

7. По этому новому АФР синтезируется новый ДМ, который подключается к АР. Далее ДН вычисляется либо экспериментально измеряется.

При необходимости этот процесс повторяется до тех пор, пока новая ДН не будет максимально приближена к заданной.

На рис. 5 показан процесс формирования нового АФР, учитывающего отражения от излучателей АР и переизлучение этих волн от входов ДМ: на рис. 5, а представлены амплитуды, а на рис. 5, б – фазовые распределения этих волн.

На рис. 6 показаны новые амплитудные распределения, полученные в результате трех итераций:  $U_{nA}^{\oplus}$ ,  $U_{nA.it1}^{\oplus}$ ,  $U_{nA.it2}^{\oplus}$ ,  $U_{nA.it3}^{\oplus}$ , а на рис. 7 – новые фазовые распределения в результате тех же трех итераций:  $\psi_{nA.it1}^{\oplus}$ ,  $\psi_{nA.it2}^{\oplus}$ ,  $\psi_{nA.it3}^{\oplus}$ .

На этих же графиках показаны разности итерационных распределений: амплитудных  $\Delta U_{nA(1-2)}^{\oplus}$ ,  $\Delta U_{nA(2-3)}^{\oplus}$  и фазовых  $\Delta \psi_{nA(1-2)}^{\oplus}$ ,  $\Delta \psi_{nA(2-3)}^{\oplus}$ .

Из представленных зависимостей следует, что итерационный процесс довольно быстро сходится к некоторому установившемуся новому АФР.

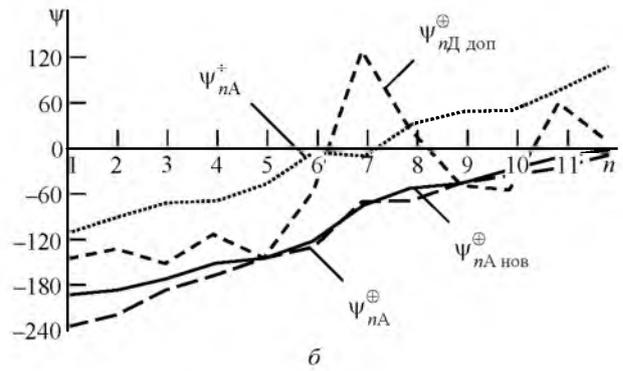
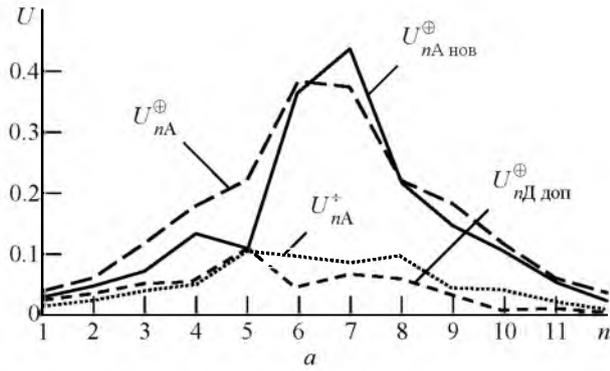


Рис. 5

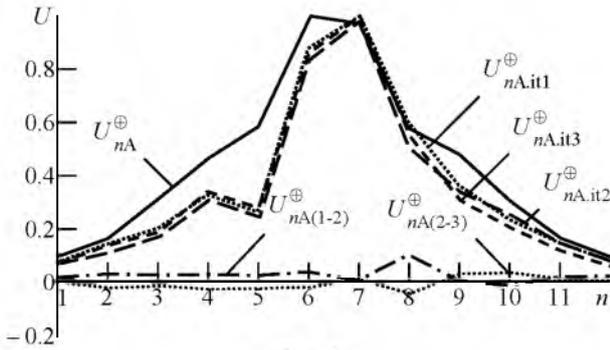


Рис. 6

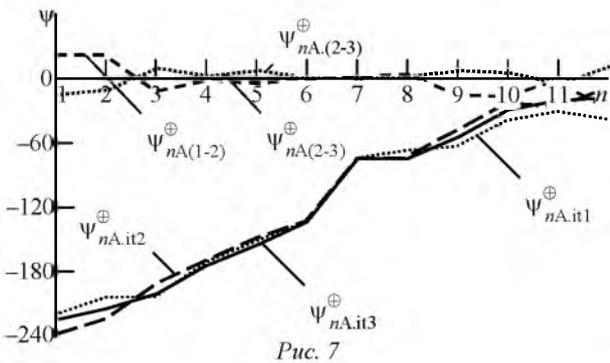


Рис. 7

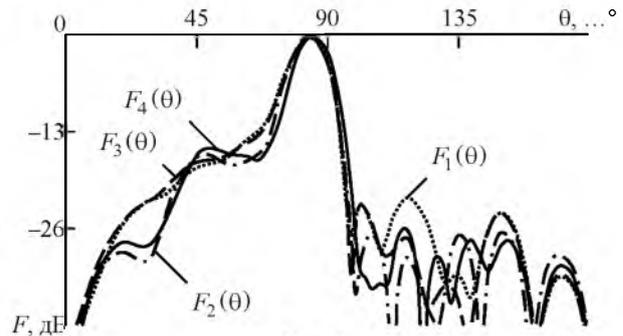


Рис. 8

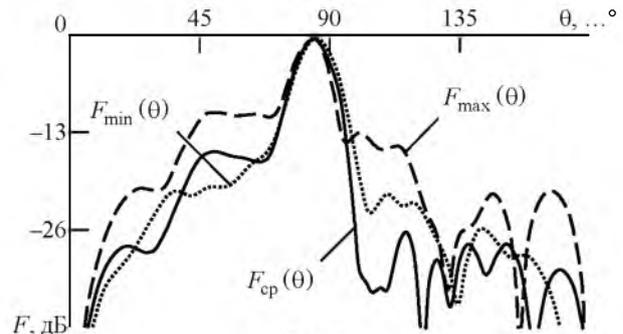


Рис. 9

**Результаты синтеза.** В результате трех итераций получены АФР (рис. 8), которым соответствуют ДН:  $F_1(\theta)$  – после первой итерации;  $F_2(\theta)$  – после второй итерации;  $F_3(\theta)$  – после третьей итерации;  $F_4(\theta)$  – сдвинутая  $F_3(\theta)$  по углу места за счет линейного набега фазы на излучателях, чтобы обеспечить необходимый уровень излучения вдоль Земли.

Результаты показывают, что в процессе изменения АФР с помощью перенастройки ДМ изменяется в основном уровень бокового излучения, направленный в Землю. В установившемся АФР ДН имеет уровень бокового излучения не более  $-27$  дБ во всем диапазоне углов облучения поверхности Земли.

На рис. 9 показаны ДН в диапазоне частот:  $F_{cp}(\theta)$  – ДН на средней частоте рабочего диапазона;  $F_{min}(\theta)$  – ДН на низшей частоте рабочего

диапазона;  $F_{max}(\theta)$  – ДН на верхней частоте рабочего диапазона. Отличия этих ДН от диаграммы на средней частоте объясняются частотной зависимостью матриц рассеяния как излучателей АР, так и схемы ДМ.

**Обсуждение результатов.** В табл. 3 приведены параметры ДН на трех частотах рабочего диапазона: на средней частоте  $F_{cp}(\theta)$ ; на нижней частоте рабочего диапазона  $F_{min}(\theta)$ ; на верхней частоте рабочего диапазона  $F_{max}(\theta)$ . Коэффици-

Таблица 3

ДН	$D_m$ , дБ	$2\theta_{0,5}$ , ...°	$F_{\Sigma}(90^\circ)$ , дБ	$\Delta D_m$ , дБ	$S(-6 \text{ дБ})$ , дБ/...°	$q_{бок}$ , дБ
$F_{min}$	9.23	11.8	-1.86	0.436	1.47	21.2
$F_{cp}$	9.69	11.2	-2.8	0.547	1.77	26.2
$F_{max}$	9.06	10.6	-4.78	0.896	1.74	20.6

ент направленного действия  $D_m$  максимален на средней частоте и равен 9.69 дБ, а на минимальной и максимальной частотах он меньше и равен 9.23 и 9.06 дБ соответственно. Это объясняется повышенным уровнем бокового излучения  $q_{бок}$ : 26.2 дБ на средней частоте; 21.2 дБ – на минимальной; 20.6 дБ – на максимальной частоте.

Ширина ДН  $2\theta_{0.5}$  с ростом частоты уменьшается от  $11.8^\circ$  на минимальной частоте до  $10.6^\circ$  на максимальной частоте. Уровень излучения вдоль Земли  $F_\Sigma(90^\circ)$  на средней частоте равен  $-2.8$  дБ от максимума, на минимальной частоте равен  $-1.86$  дБ, на максимальной частоте равен  $-4.78$  дБ. Неравномерность максимума КНД в

азимутальной плоскости  $\Delta D_m$  не превышает 0.9 дБ на максимальной частоте и 0.44 дБ на минимальной частоте. Крутизна склона ДН вдоль Земли на уровне  $-6$  дБ от максимума ДН колеблется в пределах от 1.47 до 1.77 дБ/...°.

**Выводы и заключение.** Таким образом, исследование итерационного метода конструирования линейной антенны с заданной (одной из наиболее сложных) косекансной формой ДН, учитывающего взаимное влияние излучателей в АР и топологии делителя мощности, показало устойчивость итерационного процесса, приводящего к ДН, мало отличающейся от заданной в рабочем диапазоне частот.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Французов А. Д. Метод неортогональных парциальных диаграмм синтеза линейных антенных решеток // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2014. Вып. 5. С. 3–9.

2. Французов А. Д. Оптимизация антенной решетки с косекансной диаграммой направленности // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2016. Вып. 1. С. 44–50.

Статья поступила в редакцию 03 декабря 2017 г.

3. Пат. RU 2 639 563 С1 МПК H01Q21/29 (2006.01). Все-направленная антенная система со специальной диаграммой направленности / О. П. Егоров, А. Д. Французов, В. В. Шифрин, М. А. Велькович. Опубл. 21.12.2017. Бюл. № 36.

4. Французов А. Д. Электродинамические основы расчета и проектирования экранов и СВЧ устройств. Челябинск: Изд-во ЧПИ, 1979. 98 с.

**Никитин Владимир Васильевич** – магистр техники и технологии по специальности радиотехника (2011) Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Старший инженер ООО «НПП "Цифровые радиотехнические системы"». Автор пяти научных публикаций. Сфера научных интересов – антенно-фидерные устройства; синтез антенн; устройства СВЧ.  
E-mail: NikitinV777@yandex.ru

**Французов Алексей Дмитриевич** – кандидат технических наук (1970), доцент (1973), Почетный Радист России (2003), главный специалист ООО «НПП "Цифровые радиотехнические системы"». Автор более 130 научных работ. Сфера научных интересов – антенно-фидерные системы летательных аппаратов, фазированные антенные решетки, антенные системы для сверхширокополосных коротко импульсных сигналов.  
E-mail: alexeyfrontsuzov@mail.ru

### REFERENCES

1. Frantsuzov A. D. Method of Non-Orthogonal Partial Diagrams of Linear Antenna Array Synthesis. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossii. Radioelektronika* [Journal of the Russian Universities. Radioelectronics]. 2014, no. 5, pp. 3–9. (In Russian)

2. Frantsuzov A. D. Antenna Array Optimization with Cosine Directional Pattern. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossii. Radioelektronika* [Journal of the Russian Universities. Radioelectronics]. 2016, no. 1, pp. 44–50.

Received December, 03, 2017

3. Egorov O. P., Frantsuzov A. D., Shifrin V. V., Vell'kovich M. A. *Vsenapravlennoy antennaya sistema so spetsial'noi diagrammoi napravlennosti* [Omnidirectional Antenna System with Special Direction Pattern] Patent RF, no. 2 639 563, 2017.

4. Frantsuzov A. D. *Elektrodinamicheskie osnovy rascheta i proektirovaniya ekranov i SVCh ustroystv* [Electrodynamic Basis for Calculation and Design of Shields and Microwave Devices]. Chelyabinsk: *Izd-vo ChPI*, 1979, p. 98.

**Vladimir V. Nikitin** – Master's Degree in Engineering and Technology in Radio Engineering (2011) of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". Senior Engineer in LLC «RPE "Digital Radio Equipment Systems"» (Saint Petersburg). The author of 5 scientific publications. Area of expertise: antenna-feeder devices; synthesis of antennas; microwave devices.  
E-mail: NikitinV777@yandex.ru

**Aleksey D. Frantsuzov** – Ph.D. in Engineering (1970), Associate Professor (1973), Honored Radio Operator of Russia (2003), leader scientist in LLC «RPE "Digital Radio Equipment Systems"» (Saint Petersburg). The author of more than 130 scientific publications. Area of expertise: antenna-feeder systems of aircraft, phased antenna arrays, antenna systems for ultra-wideband short-pulse signals.  
E-mail: alexeyfrontsuzov@mail.ru