

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сазонов Д. М., Гридин А. Н., Мишустин Б. А. Устройства СВЧ: учеб. пособие / под ред. Д. М. Сазонова. М.: Высш. шк., 1981. 295 с.
2. Hsu S.-K., Tsai C.-H., Wu T.-L. A novel miniaturized forward-wave directional coupler with periodical mushroom-shaped ground plane // IEEE Trans. microw. theory tech. 2010. Vol. MTT-58, № 8. P. 2277–2283.
3. Hsu S.-K., Yen J.-C., Wu T.-L. A novel compact forward-wave directional coupler design using periodical patterned ground structure // IEEE Trans. microw. theory tech. 2011. Vol. 59, № 5. P. 1249–1257.
4. Backward couplers using coupled composite right/left handed transmission lines / I. A. Mocanu, M. G. Banciu, N. Militaru et al. // Proc. of 8th Int. conf. on communica-
- tions. Bucharest, 10–12 June 2010. Bucharest: IEEE, 2010. Vol. 1. P. 267–271.
5. Mongia R., Bahl I. J., Bhartia P. RF and microwave coupled-line circuits. Norwood: Artech house, 1999. 544 p.
6. Прудис И. Н., Оборжицкий В. И. Новый подход к аналитическому расчету полосковых направленных ответвителей с полной симметрией структуры // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2011. Т. 54, № 9. С. 12–23.
7. Munina I., Vendik I., Crnojevic-Bengin V. Design of 0-dB reconfigurable directional coupler using metamaterial structure // 7th Int. Congress on advanced electromagnetic materials in microwaves and optics. Bordeaux, 16–21 Sept. 2013. Bordeaux: IEEE, 2013. P. 139–141.

I. V. Munina

Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

### Coupled line directional couplers with controlling type of directivity

*The original design approach for 0-dB directional coupler with forward and backward coupling in two different frequency bands is proposed. The device is realized by loading the coupled line based directional coupler by split ring and mushroom resonators. Under discussion is the reconfigurable directional coupler with control of the type of directivity from forward to backward one and vice versa, provided by changing the capacitance of the varactor, inserted into the gaps of split ring resonators.*

Directional coupler, directivity, control, DC blocking

Статья поступила в редакцию 2 сентября 2015 г.

УДК 621.396.677

С. В. Балландович, Г. А. Костиков, Л. М. Любина, М. И. Сугак  
 Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
 университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)  
 Н. В. Самбуров  
 ОАО "Тайфун" (Калуга)

## Характеристики широкополосной вибраторной фазированной антенной решетки дециметрового диапазона

*Приведены результаты проектирования широкополосной эквидистантной фазированной антенной решетки (ФАР) дециметрового диапазона, построенной на основе вибраторных излучателей. Представлены частотные зависимости коэффициентов отражения в тракте питания элементов в составе бесконечной ФАР, а также частотные и динамические зависимости коэффициента усиления для широкополосной ФАР, состоящей из конечного числа элементов.*

### Фазированная антенная решетка, коэффициент направленного действия, коэффициент усиления, сканирование луча, динамические характеристики

Перспективным направлением развития радиолокационных станций (РЛС) дециметрового диапазона является создание широкополосных фазированных антенных решеток (ФАР) с дву-

мерным широкоугольным качанием луча, позволяющих совместить функции различных систем, в частности, систем радиолокации и связи [1].

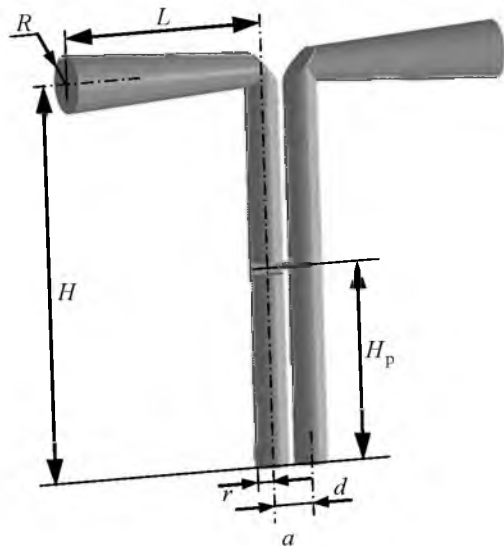


Рис. 1

При проектировании широкополосных ФАР перед разработчиком ставится ряд задач, связанных с проектированием и оптимизацией базового элемента, геометрии раскрыва, способа построения излучающего полотна, построения системы питания (внутреннее, пространственное, последовательное, параллельное и т. п.), системы управления лучом, системы контроля работоспособности (в том числе и встроенного контроля по СВЧ) [2]. Наиболее важным является обеспечение высокого уровня согласования каждого излучателя в широких интервалах частот и секторе углов сканирования при обеспечении стабильной пространственной диаграммы направленности (ДН) излучателя в составе решетки. Среди разнообразных методов построения широкополосных ФАР особого внимания заслуживает использование компактных широкополосных элементов с малым междуэлементным расстоянием в составе эквидистантной решетки. В таком случае частотный диапазон антенны сверху ограничивается появлением дифракционного лепестка при сканировании, а снизу – существенным рассогласованием излучателей с фидерной линией.

При определенных условиях получить полосу рабочих частот до октавы удастся в ФАР, выполненной на основе относительно узкополосных вибраторов (как самостоятельных уединенных излучателей). При этом реализуется режим сильной взаимной связи между элементами, обусловленной малым междуэлементным расстоянием или даже их полным гальваническим соединением [3]–[6].

**Постановка задачи.** В настоящей статье представлены результаты проектирования широкополосной эквидистантной ФАР дециметрового диапазона, выполненной на основе вибраторных излучателей. Для электродинамического анализа

характеристик использованы метод конечных элементов и метод конечного интегрирования в пределах ячейки Флоке. Исследование выполнено в два этапа: сначала рассмотрены характеристики, рассчитанные на основе бесконечной двумерной модели ФАР, затем проанализированы особенности функционирования и выполнена оптимизация характеристик конечной ФАР.

**Характеристики бесконечной модели ФАР.** В качестве базового элемента принят широкополосный вибраторный излучатель [7] (рис. 1, а – модель, б – внешний вид). Частотные зависимости коэффициента отражения в тракте питания элемента, находящегося в свободном пространстве (кривая 1) и в составе бесконечной ФАР (кривая 2), приведены на рис. 2.

Из рис. 2 следует, что спроектированный излучатель в свободном пространстве имеет хорошие характеристики с точки зрения согласования с фидером: по уровню  $|S_{11}| = -10$  дБ полоса рабочих частот лежит в интервале  $f/f_0 = 0.8 \dots 1.78$  ( $f_0$  – центральная частота рабочего диапазона). В то же время в составе бесконечной ФАР уро-

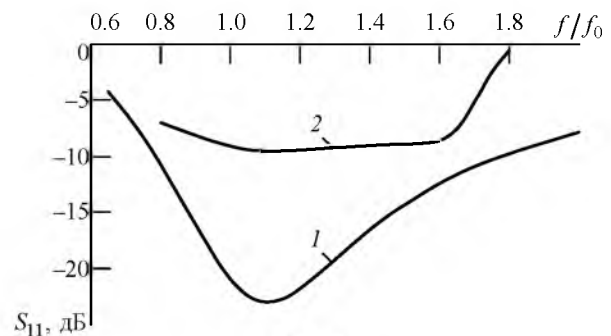


Рис. 2

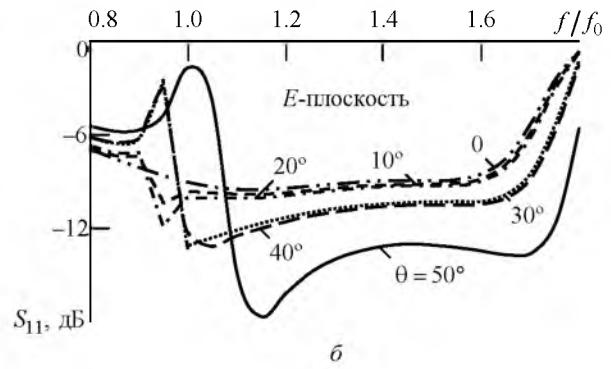
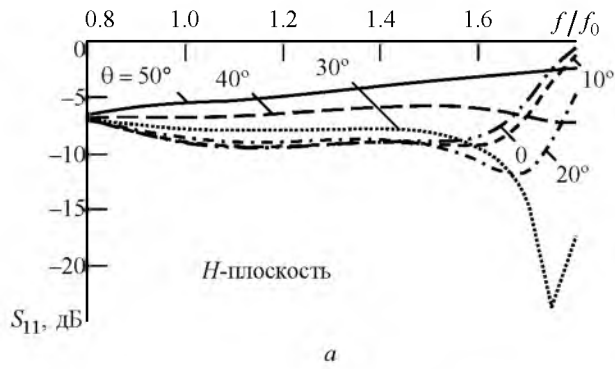


Рис. 3

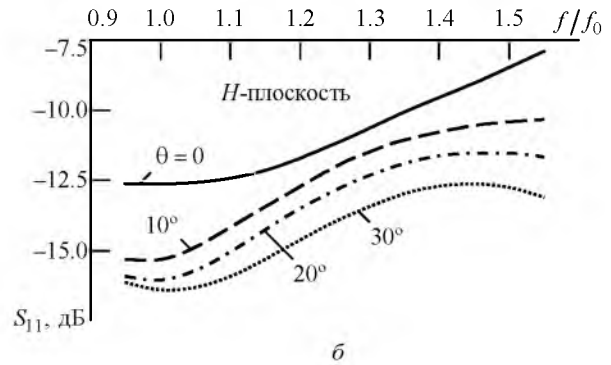
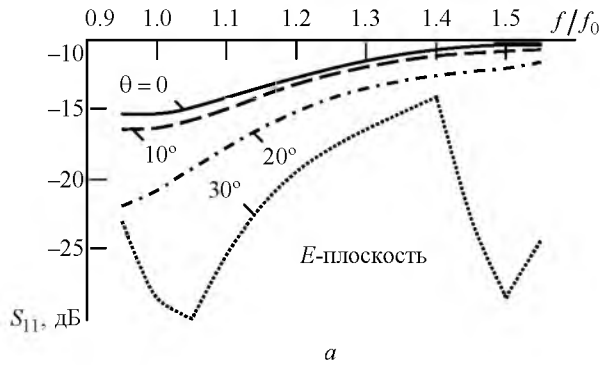


Рис. 4

вень рассогласования вибратора с питающим трактом значительно возрастает: частотная зависимость  $|S_{11}|$  не опускается ниже  $-9.5$  дБ (рис. 2).

При сканировании характеристики согласования ухудшаются еще сильнее. На рис. 3 представлены частотные зависимости  $|S_{11}|$  излучателя в составе бесконечной ФАР при различных углах сканирования в  $H$ - и в  $E$ -плоскостях. При сканировании в  $H$ -плоскости значения коэффициента отражения возрастают практически во всем частотном диапазоне с увеличением угла  $\theta$ , на который отклонен главный лепесток ДН (рис. 3, а) (угол  $\theta$  отсчитывается от нормали к раскрыву ФАР).

Характер изменения зависимостей  $|S_{11}|$  от частоты при сканировании в  $E$ -плоскости (рис. 3, б) несколько иной. В значительной полосе частот коэффициент отражения даже уменьшается, но в интервале частот  $f/f_0 = 0.9 \dots 1.1$  возникает выброс, который с увеличением угла  $\theta$  приобретает резонансный характер. Подобное поведение при сканировании в составе ФАР является отличительной особенностью излучателей с симметрирующим устройством и связано с токами, протекающими по стойкам, на которых установлен вибратор. Распределение тока на стойках меняется в зависимости от угла сканирования и при определенных направлениях главного максимума ДН становится неприемлемым с точки зрения согласования. Подробнее этот эффект рассмотрен в статьях [6], [7].

В целом можно констатировать, что использование рассмотренного излучателя, оптимизированного для свободного пространства, в составе ФАР нецелесообразно. Вместе с тем оптимизация геометрии данного элемента, выполненная с учетом взаимного влияния элементов в составе ФАР, приводит к существенному улучшению характеристик. Таблица содержит основные геометрические параметры вибратора (см. рис. 1), оптимизированного для работы в свободном пространстве и в составе бесконечной ФАР с шагом  $0.47\lambda$  в  $E$ -плоскости и  $0.35\lambda$  в  $H$ -плоскости (длина волны соответствует нормированной частоте  $f/f_0 = 1$ ). Как видно из приведенных данных, в результате оптимизации геометрии элемента изменения коснулись только длины вибратора и расстояния до экрана (оба размера увеличились).

Размещение излучателя	$L/\lambda$	$H/\lambda$	$H_p/\lambda$	$R/\lambda$	$r/\lambda$	$d/\lambda$
Свободное пространство	1.400	2.867	1.567	0.233	0.133	0.333
ФАР	1.667	3.133	1.567	0.233	0.133	0.333

Частотные зависимости коэффициента отражения при различных углах сканирования (рис. 4) оптимизированного вибратора в составе двумерно-бесконечной ФАР позволяют сделать вывод, что найденная геометрия излучателя дает хорошие характеристики в заданном интервале частот и углов, причем динамические зависимости со-

гласования при сканировании в  $E$ -плоскости несколько лучше, чем в  $H$ -плоскости.

**Характеристики конечной широкополосной ФАР.** Далее приведены результаты электродинамического анализа конечной ФАР, состоящей из  $4 \times 16$  излучателей. Геометрия антенной системы представлена на рис. 5. Расчет производился для всей ФАР методом конечного интегрирования. В качестве базового элемента использовался вибратор, оптимизированный для бесконечной ФАР с размерами, приведенными в таблице.

На рис. 6 показаны частотные зависимости коэффициента усиления (КУ) ФАР  $G$  (с учетом потерь на рассогласование) при сканировании в различных плоскостях. Отклонение главного лепестка ДН осуществляется в пределах  $30^\circ$  в  $E$ -плоскости и  $45^\circ$  в  $H$ -плоскости. Предельное значение коэффициента направленного действия, рассчитанное по формуле  $4\pi ab/\lambda^2$  (где  $a, b$  – размеры раскрыва;  $\lambda$  – длина волны в свободном пространстве), составляет 20,8 дБ на нормированной частоте  $0,95 f/f_0$  и 24,7 дБ на частоте  $1,5 f/f_0$ .

Из рис. 6 следует, что наибольшие потери КУ наблюдаются при предельных углах в  $E$ - и  $H$ -плоскостях на нормированных частотах выше  $1,3 f/f_0$ .

Помимо значения КУ практический интерес представляют характеристики согласования излучателей в составе конечной ФАР при отклонении главного лепестка ДН (рис. 7). Указанные характеристики, полученные в  $H$ - и  $D$ -плоскостях, представлены на рис. 7 для набора значений угла от-

клонения (параметром является номер излучателя). Для большинства излучателей характеристики укладываются в пределах зон, показанных серой заливкой (штриховыми линиями в этих зонах представлены усредненные характеристики для таких излучателей, границы зон представляют разброс характеристик в этих зонах). Вместе с тем при любом положении луча (даже нормальном к основанию ФАР) в составе ФАР имеются излучатели, уровень согласования для которых хуже  $-10$  дБ (такие характеристики приведены на рис. 7 отдельными линиями). Это обусловлено тем, что расположенные по периметру ФАР излучатели находятся в условиях, далеких от бесконечной ФАР. Наибольшее рассогласование наблюдается на предельных углах сканирования в  $H$ -плоскости. Однако количество излучателей с  $|S_{11}| > -10$  дБ незначительно, поэтому в антенной системе отсутствуют существенные потери на рассогласование. В подтверждение этому утверждению на рис. 8 приведены зависимости мощности потерь на рассогласование

$$P_{\text{II}} = \sum_{n=1}^4 \sum_{m=1}^{16} 1 - |S_{11_{nm}}|^2,$$

где  $S_{11_{nm}}$  – коэффициент отражения от элемента решетки с индексами  $n$  и  $m$ .

Вплоть до  $\theta = 30^\circ$  потери на рассогласование уменьшаются, что хорошо согласуется с данными, приведенными на рис. 4 и 7. Наибольшие потери наблюдаются на предельных углах сканирования в  $H$ -плоскости. Тем не менее, представлен-

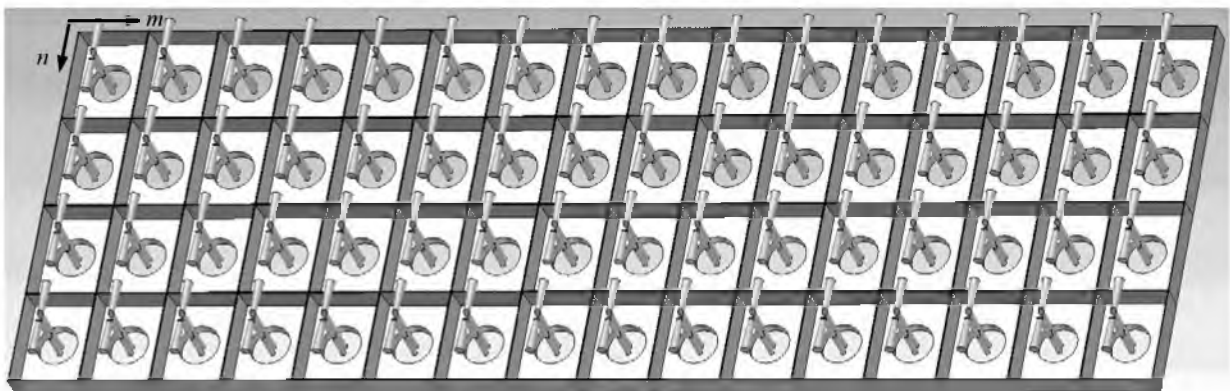


Рис. 5

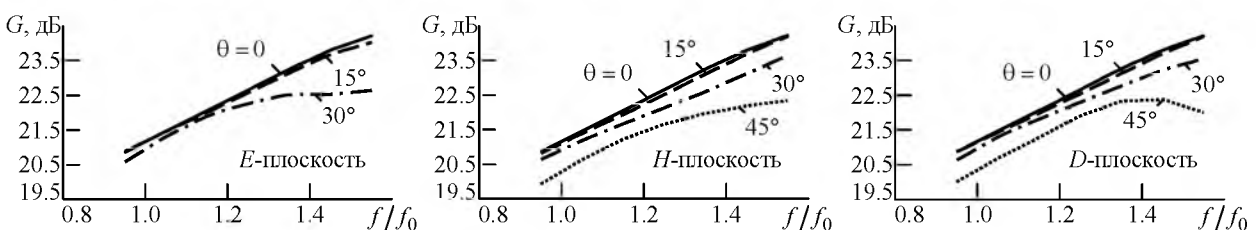


Рис. 6

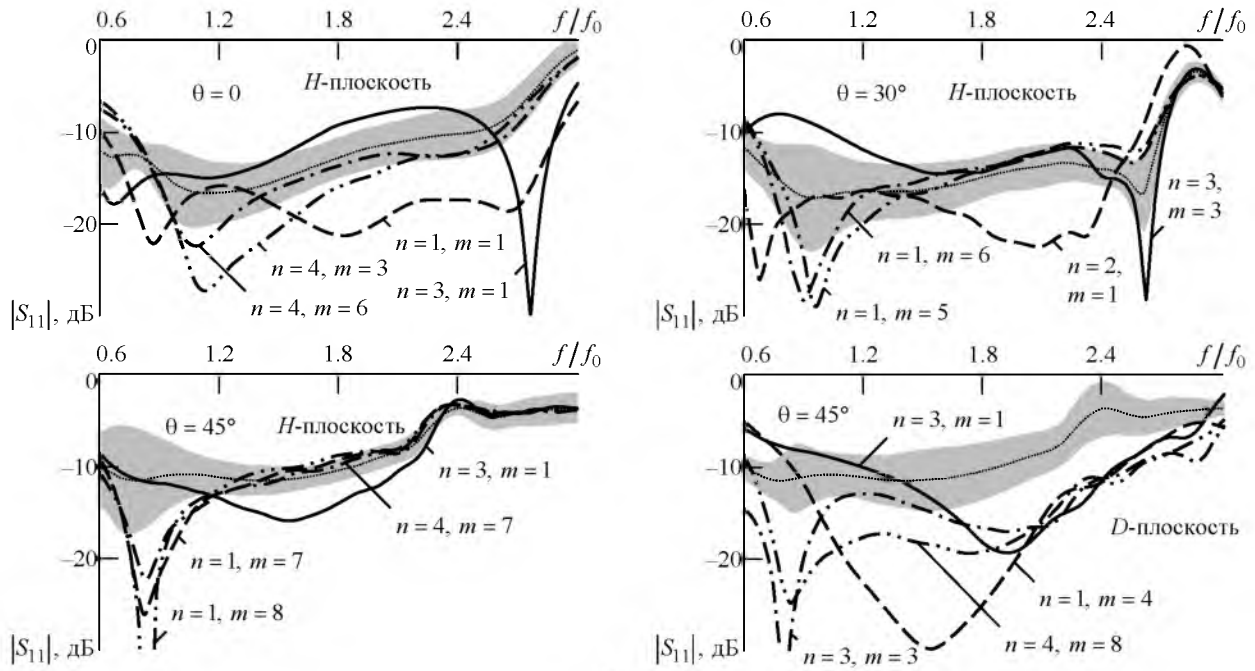


Рис. 7

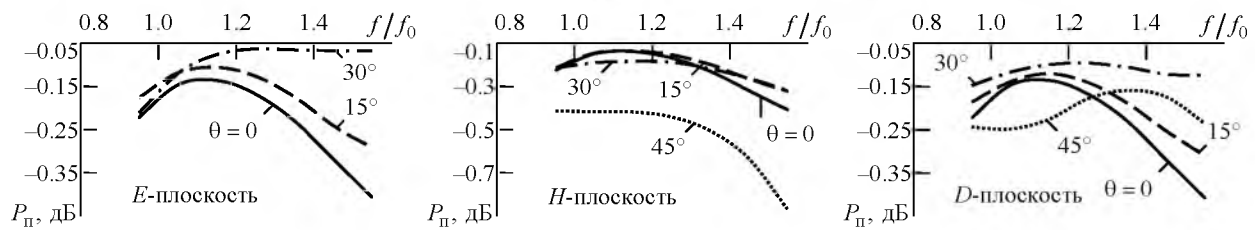


Рис. 8

ные на рис. 8 кривые не опускаются ниже  $-1$  дБ. Из этого следует, что уменьшение КУ (рис. 6) лишь частично обусловлено характеристиками согласования, а также определяется и искажениями формы ДН одиночного излучателя.

Стремление повысить технологичность базового элемента ФАР привело к его модификации



Рис. 9

(рис. 9). Характеристики ФАР, выполненной на основе подобных элементов, практически не уступают приведенным ранее характеристикам.

Представленный материал позволяет сформулировать следующие выводы.

Моделирование в ячейке Флоке показывает, что выбранный вибраторный излучатель может быть использован в широкополосных ФАР. Вместе с тем опыт, основанный на полноразмерном электродинамическом моделировании, показывает, что результаты анализа характеристик конечных ФАР могут отличаться от данных, полученных в рамках бесконечной модели.

Электродинамическое моделирование в конечной модели показывает, что при сканировании в  $E$ -плоскости ФАР, выполненная из описанных ранее вибраторных элементов, обладает приемлемыми частотными и динамическими характеристиками, однако для отдельных периферийных элементов на крайних углах сканирования наблюдается увеличение рассогласования до уровня  $-5$  дБ (согласно моделированию это наблюдается у двух элементов при отклонении на  $30^\circ$ ).

При сканировании в  $H$ -плоскости выполненная из вибраторных элементов ФАР обладает хорошими частотными и динамическими характеристиками в интервале углов сканирования  $\pm 45^\circ$  от нор-

мали в полуторакартной полосе рабочих частот. Для некоторых элементов наблюдается увеличение рассогласования до уровня  $|S_{11}| = -7 \dots -6$  дБ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kwon D. H., Pozar D. M. Energy storage and radiation Q of infinite planar dipole phased arrays // IEEE Trans. anten. propag. 2014. Vol. AP-62, № 1. P. 153–162.
2. Сугак М. И., Шарапкина Ю. И. Добротность вибраторных излучателей в составе бесконечной ФАР // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2013. Вып. 2. С. 3–7.
3. Munk B. A. Finite antenna arrays and FSS. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2003. 357 p.
4. Neto A., Lee J. J. Ultrawide-band properties of long slot arrays // IEEE Trans. anten. propag. 2006. Vol. AP-54, № 2. P. 534–543.

5. Самбуров Н. В., Кузнецова Д. А. Широкополосный вибраторный излучатель // Электромагнитные волны и электронные системы. 2014. Т. 19, № 10. С. 38–44.

6. Cavallo D., Neto A., Gerini G. PCB slot based transformers to avoid common-mode resonances in connected arrays of dipoles // IEEE Trans. anten. propag. 2010. Vol. 58, № 8. P. 2767–2771.

7. Study and design of a differentially-fed tapered slot antenna array / E. de Lera Acedo, E. Garcia, V. Gonzalez-Posadas et al. // IEEE Trans. anten. propag. 2010. Vol. 58, № 1. P. 68–78.

S. V. Ballandovich, G. A. Kostikov, L. M. Liubina, M. I. Sugak  
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"  
N. V. Samburov  
Typhoon JSC (Kaluga)

#### Characteristics of wideband dipole phased array of L-band

*Results of designing of broadband equidistant phased antenna array (PAA) of UHF range, built on the basis of dipole emitters are shown. Frequency dependences of the reflection coefficients in the path of the power elements in the infinite PAA, as well as the frequency and dynamic dependencies of the gain for the broadband PAA, consisting of a finite number of elements are presented.*

#### Phased antenna array, directive gain, gain, beam scanning, dynamic characteristic

Статья поступила в редакцию 11 июля 2015 г.