

А. В. Гнатовский, С. А. Провалов*

Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина

4, пл. Свободы, Харьков, 61077, Украина

**Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины*

12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина

E-mail: provalov@ire.kharkov.ua

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ КОМБИНИРОВАННЫХ РЕШЕТОК В АНТЕННАХ ДИФРАКЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Исследование и разработка антенн дифракционного излучения является одним из перспективных направлений антенной техники миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов. Для внедрения антенн этого класса в сферу создания устройств и комплексов различного применения необходимо разрабатывать новые методы формирования диаграмм направленности (ДН). Данные исследования направлены на экспериментальное обоснование предложенной методики получения ДН сложной формы за счет комбинации свойств прямой и наклонной гребенок. Проведено сравнение характеристик излучения этих гребенок, обоснован выбор параметров наклонной гребенки. Измеренные ДН антенны с комбинированной гребенкой подтверждают правильность выбранного подхода. Полученные результаты существенно дополняют известные свойства антенн и обосновывают возможность их применения в комплексах обзора поверхности различного базирования. Ил. 7. Библиогр.: 13 назв.

Ключевые слова: антенна дифракционного излучения, комбинация гребенок, комбинированная диаграмма направленности.

Антенные системы, как обязательный элемент радиоэлектронных комплексов связи, радиолокации, радионавигации и управления, инструментальной посадки и т. д., в существенной степени определяют их тактико-технические и эксплуатационные характеристики. Разработка принципиально новых антенных систем позволяет расширять сферы применения радиотехнических комплексов и выполняемые ими функции.

Сравнительно новым направлением в антенной технике миллиметрового диапазона волн является изучение и разработка антенных решеток, называемых антеннами дифракционного излучения. Работа таких антенн в режиме приема (передачи) основана на явлении взаимной трансформации однородных и неоднородных плоских волн при дифракции на периодических структурах [1–3]. К настоящему времени накоплен опыт расчета, проектирования, производства и практического использования таких антенн в некоторых специализированных радиоэлектронных комплексах [4–6].

На сегодняшний день очевидно, что для внедрения антенн дифракционного излучения в область проектирования радиотехнических комплексов различного применения необходимо разрабатывать новые или модифицировать известные методики формирования диаграмм направленности (ДН) с заданными характеристиками, включая ДН с несимметричной формой боковых скатов, например косекансного типа.

Особое внимание в настоящее время уделяется созданию радиолокационных систем контроля территорий аэропортов и акватории речных и морских портов. Одним из подходов решения таких задач является переход к сети нескольких компактных экономичных радиолокационных

датчиков. К настоящему времени в Институте радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины создан экспериментальный образец такой станции [7]. В рамках работ по ее модернизации и улучшению эксплуатационных характеристик проводятся экспериментальные исследования возможности формирования в угломестной плоскости ДН специальной формы.

В антенной технике СВЧ известно несколько способов формирования таких ДН. Они реализуются в зеркальных, рупорно-линзовых антеннах и в комбинациях многоэлементных линейных антенных решеток [8, 9]. Один заключается в использовании сложных, корректирующих фазу, поверхностей зеркал или линз, в других вариантах для обычных зеркальных систем используются несколько разнесенных облучателей (рупоров или линейных решеток), парциальные ДН которых формируют результирующую диаграмму сложной конфигурации.

Целью настоящей работы является представление результатов исследования возможности формирования несимметричной ДН в угломестной плоскости для плоских антенных решеток дифракционного излучения.

Как было отмечено, основной задачей работы является экспериментальная проверка предложенного метода формирования несимметричных ДН в угломестной плоскости для антенн дифракционного излучения. В качестве базовой [10] рассматривалась плоскостная антенна с апертурой $(240 \times 22)\lambda$ (рис. 1, а). ДН в угломестной плоскости (рис. 1, б) симметрична и по своим параметрам соответствует поперечному размеру апертуры. Необходимо изменить форму одного из скатов, а именно увеличить его основания в 3–4 раза. Важное дополнительное условие: сохране-

ние глубины антенны и незначительное увеличение поперечного размера апертуры.

Мы предлагаем реализовать принцип сложения в едином пространстве нескольких парциальных ДН. По аналогии с композициями

из линейных антенных решеток (например, волноводно-щелевых) апертура антенны дифракционного излучения в поперечном сечении разделяется на две области, направление излучения которых отличается на $7...10^\circ$.

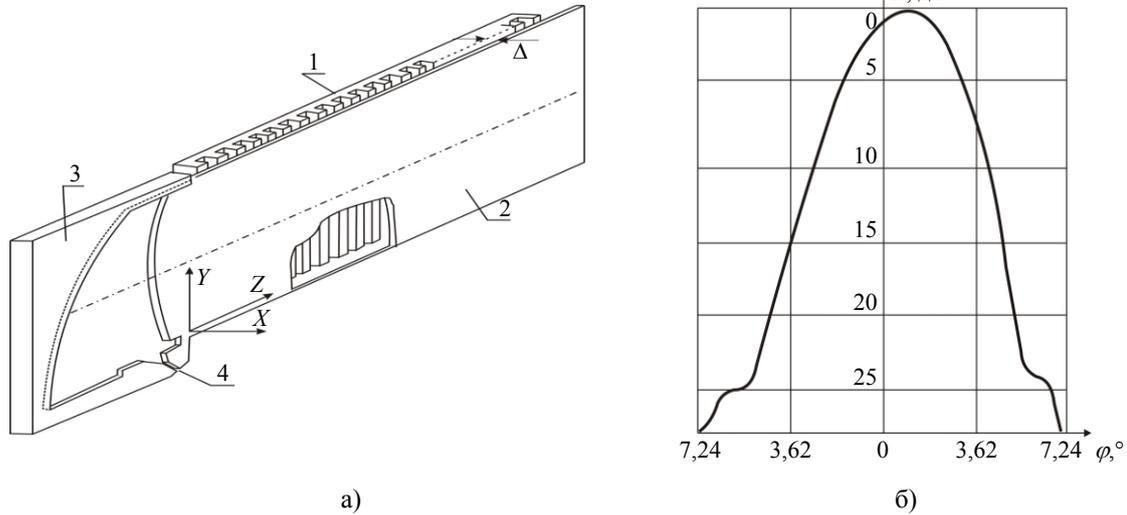


Рис. 1. Плоскостная антенна – (а); ДН в угломестной плоскости – (б)

Для реализации такой системы предлагается использовать свойство эффекта дифракции поверхностных волн на скошенных решетках [6] и возможность комбинировать плоскость излучающего раскрыва из двух (или нескольких) гребенок с различными параметрами.

Функциональная схема антенны состоит из двух основных элементов (рис. 2, а): источника поверхностной бегущей волны 1 (планарного диэлектрического волновода ПДВ) и излучающей дифракционной решетки (гребенки) 2. Величина

электродинамической связи между ними регулируется прицельным параметром Δ , который, совместно с геометрическими параметрами гребенки (относительной глубиной ламели h/λ и шириной щели d) определяют вид формируемого на раскрыве антенны амплитудно-фазового распределения (АФР) электромагнитного поля и, следовательно, основные характеристики направленности антенны [1–3]. Направление излучения в азимутальной плоскости определяется периодом гребенки l и фазовой скоростью поверхностной волны $V_{\text{фаз}}$.

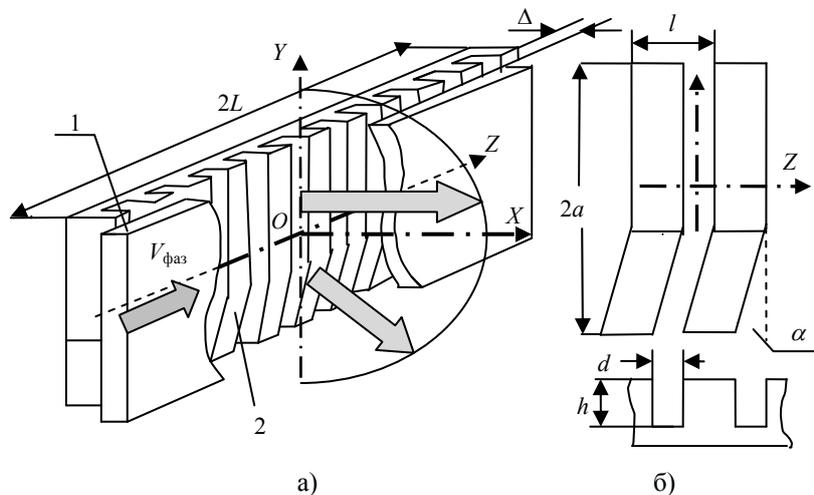


Рис. 2. Функциональная схема: а) – общий вид; б) – фрагмент гребенки

Отличием от ранее реализованных схем антенны [3–5, 10] является использование гребенки, которая состоит из двух частей (рис. 2, б). Элементы основной гребенки расположены перпендикулярно направлению распространения поверхностной волны ($V_{\text{фаз}}$), а у дополнительной – наклонно, под углом α .

Для проведения экспериментальных исследований на длине волны $\lambda = 8,3$ мм использовался элемент базовой планарной антенны с размерами излучающего раскрыва: длина $2L = 22\lambda$, ширина $2a = 20\lambda$. Источник падающей поверхностной волны ПДВ выполнен из полистирола толщиной $2b = 3,2$ мм и возбуждается рупорно-параболическим переходом (РПП) [11], что обеспечивает в поперечном сечении антенного раскрыва амплитудное распределение, симметрично спадающее к краям, а компоненты поля соответствуют низшему типу E -волн (дифракция H -поляризованной волны). Параметры гребенки: период ламелей $l = 0,72\lambda$, ширина щели $d = 0,06\lambda$ и глубина $h = 0,2\lambda$ обеспечивают на рабочей длине волны излучение главного максимума ДН с отклонением от нормали в азимутальной плоскости на 6° . Максимальная эффективность преобразования поверхностной волны в объемную обеспечивается подбором прицельного параметра Δ .

Такие параметры преобразователя поверхностной волны в объемную удовлетворяют требованиям формирования антенной остро-направленной однолепестковой ДН линейно поляризованного излучения с направлением главного лепестка, близким к нормали.

В процессе исследований измерения распределения электромагнитного поля излучения в ближней и дальней зонах проводились по известным методикам [12] на лабораторном антенном измерительном стенде. Измерительные приборы, механические устройства, технологические приспособления, входящие в состав стенда, обеспечивают точность измерения относительных амплитуд $\pm 0,2$ дБ и углового положения $\pm 0,2^\circ$.

В исследуемой антенне АФР на апертуре формируется двумя независимыми механизмами. Распределение поперек раскрыва фактически повторяет распределение на выходе РПП, а форма продольного распределения зависит от электродинамической связи элементов гребенки с полем поверхностной волны.

В первую очередь рассмотрим распределение поля в поперечном сечении ПДВ. Измерения распределения продольной компоненты электрического поля E_z проводились в трех сечениях ПДВ. На рис. 3 приведены распределения поля, соответствующие началу $-1(Z = -L)$, середине $-2(Z = 0)$ и концу $-3(Z = +L)$ области размещения гребенки. В процессе этих измерений гребенка

отводилась от поверхности ПДВ на расстояние $\Delta \geq 3\lambda$. Там же для сравнения сплошной линией приведено типовое распределение $\cos^2(U\pi/2)$, соответствующее известным характеристикам на выходе РПП [13].

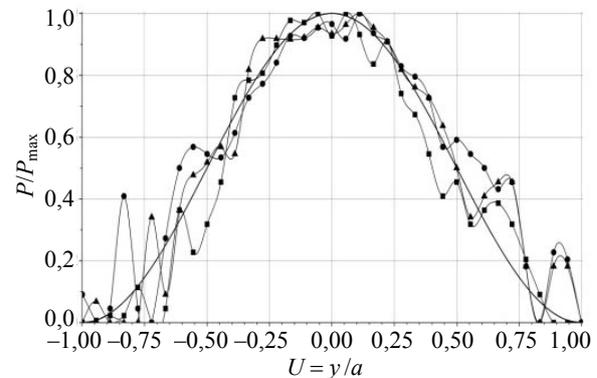


Рис. 3. Распределение поля в поперечных сечениях ПДВ, сечение 1 – ■—■; сечение 2 – ●—●; сечение 3 – ▲—▲; $\cos^2(U\pi/2)$ – —

Картина распределения поля при удалении от РПП изменяется незначительно, а амплитуда в центральной части практически остается постоянной. В дальнейшем именно это распределение поля будет играть основную роль в формировании ДН в угломестной плоскости.

Основная гребенка (прямая) установлена так, что ее верхний край отстоит от верхней границы ПДВ на 5 мм ($U_1 \approx -0,95$), а нижний приходится на координату поперечного сечения 110 мм ($U_2 \approx +0,3$). Вдоль области взаимодействия (ось OZ) в исследуемой антенне реализована клиновидная связь гребенки с полем поверхностной волны. Подстройка осуществлялась путем перемещения начала и конца гребенки при постоянном контроле формы ДН и уровня сигнала в максимуме главного лепестка. После подстройки значения прицельного параметра: в начале области взаимодействия $\Delta = 4,5$ мм, в конце – $\Delta = 0,8$ мм. Результаты измерения ДН приведены на рис. 4.

Форма ДН в азимутальной плоскости типична для амплитудных распределений, когда по отношению к центру апертуры форма скатов несимметрична. В угломестной плоскости ДН (рис. 4, б) формируется несимметричным распределением поля, границы (U_1 и U_2) которого определены выше.

Эта угломестная ДН является первой из двух ДН, которые будут совмещаться в пространстве для получения комбинированной диаграммы. Незадействованная часть поля (от U_2 до $U = +1$) в поперечном сечении ПДВ будет использована для формирования второй, дополнительной ДН за счет установки дополнительной гребенки, параметры которой определяются из

экспериментально полученной зависимости направления излучения в угломестной плоскости φ° при повороте гребенки на угол α° вокруг ее центра.

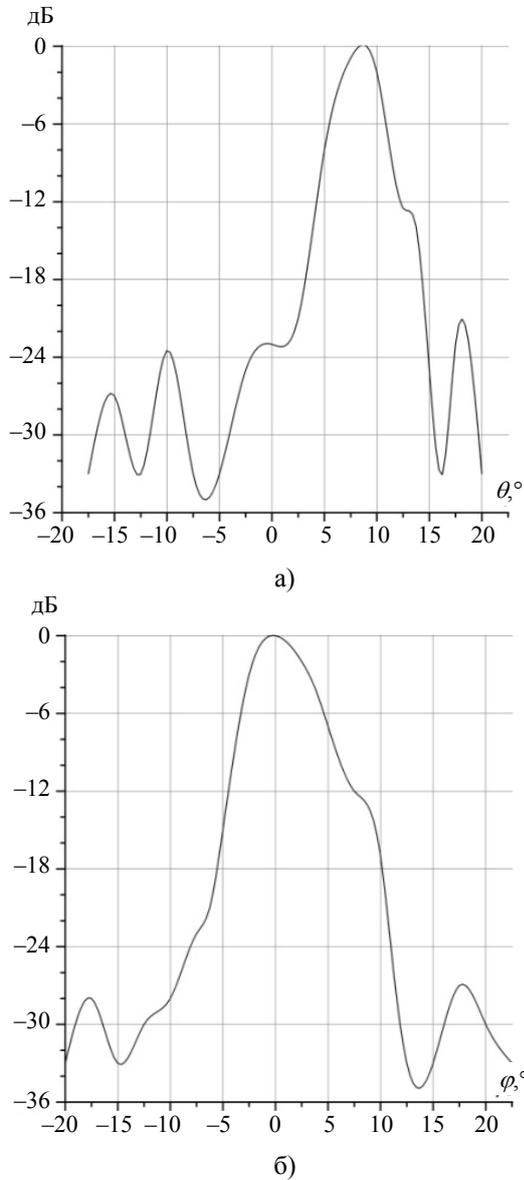


Рис. 4. ДН в азимутальной плоскости (а); ДН в угломестной плоскости (б)

Описание этого эффекта содержится в работе [6]. В процессе измерений положение раскрыва гребенки относительно поверхности ПДВ повторяло описанную выше ситуацию с клиновидной связью. Полученные результаты в виде графической зависимости приведены на рис. 5. В интересующем нас диапазоне отклонения ДН в угломестной плоскости $-15^\circ < \varphi^\circ < 15^\circ$ зависимость практически линейна.

По этой зависимости определяем угол наклона α ламелей дополнительной гребенки, с помощью которой будет формироваться резуль-

тирующая ДН. Для дополнительной гребенки взяты параметры ламелей базовой гребенки. Отличие состоит в наклоне ламелей на угол $\alpha = 6,0^\circ$ и ширине апертуры 75 мм.

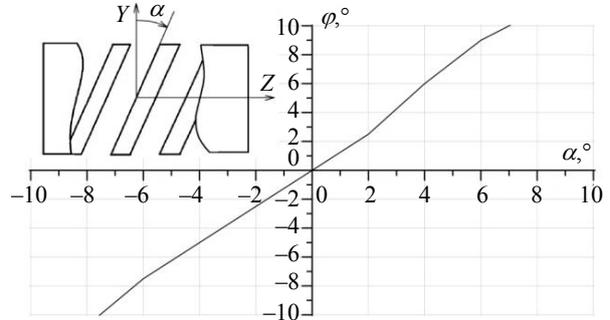


Рис. 5. Зависимость направления излучения от угла поворота решетки

Эти две гребенки скомпонованы так, как показано на рис. 2, б. Очевидно, что обе излучающие апертуры необходимо сфазировать. Если перемещать вдоль оси OZ дополнительную гребенку относительно основной, то соотношение фаз двух парциальных ДН будет изменяться, в результате возможно изменение формы результирующей ДН.

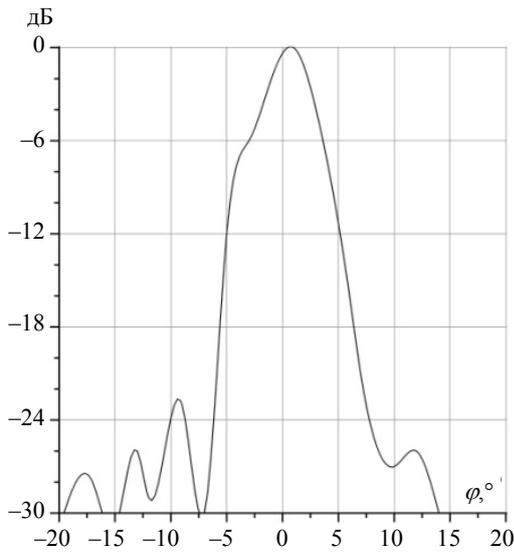
Очевидно, что достаточно изучить результат перемещения в пределах одного периода перемещения основной решетки, так как при большем интервале перемещения картина сложения парциальных ДН будет повторяться.

Для решения поставленной задачи нам необходимо знать основные характеристики излучения гребенок, с которыми предстоит работать.

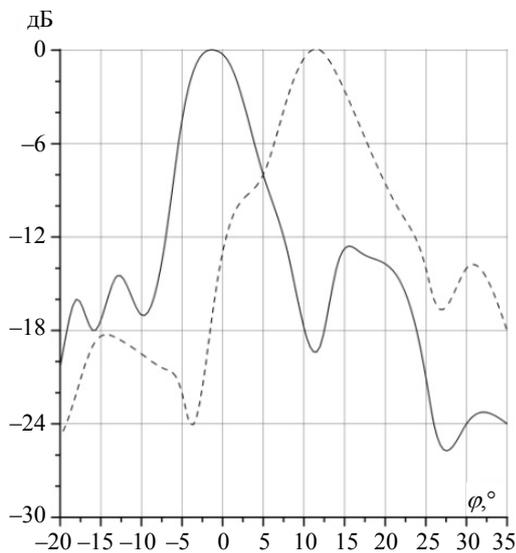
На рис. 6 представлены ДН в угломестной плоскости трех гребенок: ДН однородной гребенки шириной 170 мм (рис. 6, а), ДН прямой гребенки шириной 100 мм и смещенной к верхнему краю ПДВ и ДН скошенной, дополнительной гребенки шириной 75 мм, расположенной на остальной части апертуры (рис. 6, б).

Требуется изменить конфигурации одного из скатов ДН, которая соответствует однородной гребенке. Фактически производим замену однородной гребенки на составную из двух подрешеток, каждая из которых взаимодействует с несимметричным распределением поля поверхностной волны (см. рис. 3). Соответственно, формируемые каждой из подрешеток ДН (рис. 6, б) в угломестной плоскости также несимметричны.

Как отмечалось выше, результат сложения двух ДН в одном пространстве зависит от фазовых соотношений при их формировании. В нашем случае процедура изменения начальной фазы для одной из гребенок по отношению к другой достигается перемещением одной подрешетки вдоль продольной оси системы.



а)



б)

Рис. 6. ДН сплошной (а); ДН прямой (—) и скошенной (- -) гребенок (б)

На рис. 7 представлены ДН в угломестной плоскости для трех наиболее характерных ситуаций взаимного расположения подрешеток:

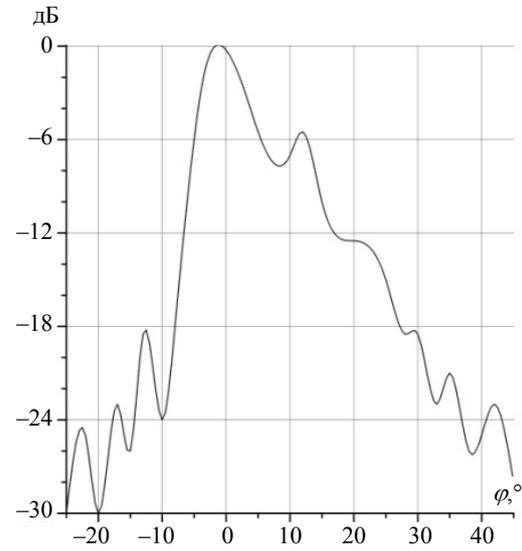
1) первая полость скошенной подрешетки является продолжением первой полости прямой подрешетки (см. рис. 1, б);

2) первая полость скошенной подрешетки располагается в средней точке первого периода прямой подрешетки;

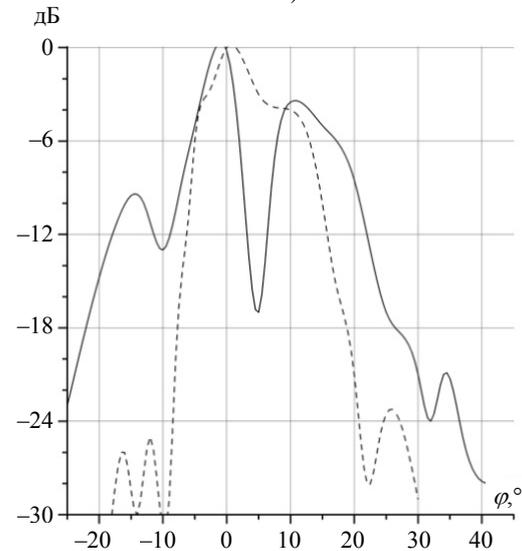
3) полость скошенной подрешетки продолжает полость прямой подрешетки на последнем элементе.

Анализ полученных ДН необходимо проводить, сравнивая их конфигурацию и параметры с ДН однородной гребенки (базовой). Комбина-

ция из двух подрешеток при реализации первого варианта стыковки позволила существенно изменить правый скат ДН при незначительном изменении, от 5 до 6,5°, ее ширины по уровню -3 дБ. Основание ДН растянулось более чем в три раза, правый скат достаточно монотонно спадает до уровня -25 дБ в диапазоне углов φ° от 0 до 40°.



а)



б)

Рис. 7. ДН при положении 1 (а); ДН при положении 2(—) и 3(- -) – (б)

По внешнему виду результирующей ДН можно сделать вывод, что парциальные ДН подрешеток сфазировались и направление излучения дополнительной (скошенной) гребенки выбрано правильно. Результирующие ДН для второго и третьего вариантов стыковки (положение 2 и 3) демонстрируют наличие разфазировки парциальных ДН.

Выводы. Предложен новый подход к формированию несимметричных ДН для антенн дифракционного излучения, основанный на комбинации свойств формирования направления излучения прямой и скошенной гребенок.

Экспериментально исследована возможность влияния на конфигурацию формируемой ДН в угломестной плоскости антенны дифракционного излучения. Получено практическое подтверждение реализуемости принятого подхода к процессу формирования несимметричной результирующей ДН в угломестной плоскости при помощи двух различных дифракционных решеток.

Использование комбинации и двух гребенок не приводит к изменению основных габаритов антенны: излучающей апертуры и глубины. Характеристики направленности в азимутальной плоскости остаются практически неизменными.

Полученные результаты являются основой для проведения разноплановых экспериментальных и теоретических исследований по изучению характеристик комбинированных решеток и разработке детальной методики получения заданных характеристик формируемых диаграмм направленности в угломестной плоскости антенн дифракционного излучения.

Библиографический список

1. *Андренко С. Д.* Антенные решетки миллиметрового диапазона / С. Д. Андренко, Н. Д. Девятков, В. П. Шестопапов // Докл. АН СССР. – 1978. – № 6. – С. 1340–1343.
2. *Провалов С. А.* Преобразование поверхностных волн в объемные излучателями мм и субмм диапазонов волн: автореф. дис. канд. физ.-мат. наук / С. А. Провалов; Ин-т радиофизики и электрон. АН УССР. – Х., 1985. – 21 с.
3. *Евдокимов А. П.* Новое направление в технике антенных решеток / А. П. Евдокимов, В. В. Крыжановский // Радиоэлектрон. – 1996. – № 9. – С. 54–61.
4. *Евдокимов А. П.* Плоские антенные решетки с косекансной формой диаграммы направленности 8-миллиметрового диапазона волн / А. П. Евдокимов, В. В. Крыжановский // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2003. – 8, № 10. – С. 52–58.
5. *Шило С. А.* Перспективы создания многолучевых сканирующих СВЧ-радиометрических систем на основе антенн с открытыми электродинамическими структурами / С. А. Шило, В. А. Комяк // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2008. – 13, № 2–3. – С. 101–110.
6. *Шестопапов В. П.* Физические основы миллиметровой и субмиллиметровой техники: в 2 т. Т. 1 / В. П. Шестопапов. – К.: Наук. думка, 1985. – 216 с.
7. *Полупроводниковый когерентный радиолокатор миллиметрового диапазона для контроля наземного движения в аэропортах* / П. Н. Мележик, В. Б. Разказовский, Н. Г. Резниченко и др. // Наука та інновації. – 2008. – 4, № 3. – С. 5–11.
8. *Жук М. С.* Проектирование антенно-фидерных устройств / М. С. Жук, Ю. Б. Молочков. – М.: Энергия, 1966. – 648 с.
9. *Радиолокационные станции бокового обзора* / А. П. Реутов, Б. А. Михайлов, Г. С. Кондратенков, Б. В. Бойко. – М.: Сов. радио, 1970. – 360 с.
10. *Плоскостная антенна дифракционного излучения радиолокационного комплекса миллиметрового диапазона* / П. Н. Мележик, Ю. Б. Сидоренко, С. А. Провалов и др. // Изв. вузов. Радиоэлектрон. – 2010. – 53, № 5. – С. 12–21.
11. *Провалов С. А.* Исследование полей ограниченного планарного диэлектрического волновода / С. А. Провалов, С. Д. Андренко // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2007. – 12, № 3. – С. 476–481.
12. *Измерения в электронике. Справочник: в 2 т. Т. 1* / под ред. Б. А. Доброхотова. – М.–Л.: Энергия, 1965. – 288 с.
13. *Фрадин А. З.* Антенны сверхвысоких частот / А. З. Фрадин. – М.: Сов. радио, 1957. – 647 с.

Рукопись поступила 17.03.2014.

A. V. Hnatovskyi, S. A. Provalov

INVESTIGATION OF COMBINED GRATINGS PROPERTIES IN DIFFRACTION RADIATION ANTENNAS

Research and development of diffraction radiation antennas is one of the promising areas of antenna technology in the millimeter-wave and submillimeter-wave regions. For the introduction of this class of antennas in the creation of devices and systems for various applications it is necessary to develop new techniques for formation of radiation pattern. This study is aimed at experimental validation of proposed method for obtaining special shape radiation pattern by combining the properties of direct and inclined combs. A comparison of radiation characteristics of straight and inclined gratings was made. The choice of inclined comb parameters was substantiated. The measured radiation pattern of antenna with combined comb confirm the correctness of the chosen approach. The obtained results are an essential complement to the known properties of antennas and justify their applicability in different complexes of surface overview.

Key words: diffraction radiation antenna, combination of gratings, combined radiation pattern.

A. В. Гнатовський, С. А. Провалов

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОМБІНОВАНИХ РЕШТОК В АНТЕНАХ ДИФРАКЦІЙНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Дослідження й розробка антен дифракційного випромінювання є одним з перспективних напрямів антенної техніки міліметрового та субміліметрового діапазонів. Впровадження антен цього класу в сферу створення пристроїв і комплексів різноманітного застосування потребує розробки нових методів формування діаграм спрямованості (ДС). Ці дослідження спрямовані на експериментальне обґрунтування запропонованої методики отримання ДС складної форми внаслідок комбінації властивостей прямої і похиленої гребінок. Проведено порівняння характеристик випромінювання цих гребінок, обґрунтовано вибір параметрів похиленої гребінки. Виміряні ДС антени з комбінованою гребінкою підтверджують правильність вибраного підходу. Одержані результати суттєво доповнюють відомі властивості антен і обґрунтовують можливість їх застосування в комплексах огляду поверхні різного базування.

Ключові слова: антена дифракційного випромінювання, комбінація гребінок, комбінована діаграма спрямованості.