

УДК 621.396.67

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МИКРОПОЛОСКОВЫХ АНТЕНН НА ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТАХ ИЗ КОМПОЗИТОВ С МАЛЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ РАССЕЯНИЯ

В. Н. Красюк,

д-р техн. наук, профессор

В. В. Горбацкий,

ассистент

Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения (ГУАП)

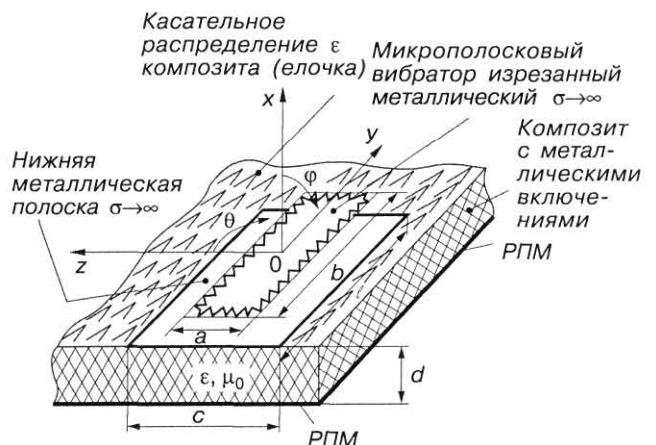
На примере расчета характеристик излучения ленточного микрополоскового вибратора и экспериментальных исследований описаны изменения в его конструктивном исполнении, которые дают возможность использовать его с композиционными материалами и уменьшить величину рассеяния на 8–13 дБ по сравнению с обычным полуволновым вибратором.

On an example of calculation of radiation characteristics of the tape microstrip vibrator and experimental researches the changes in its design are adduced which enable to use it with composite materials and to reduce value of dissipation on 8–13 dB as contrasted to by normal half-wave dipole.

Возросшая потребность в легких низкосилуэтных конформных и недорогих антеннах, которые можно размещать на самолетах, выполненных из композитов с малыми рассеивающими свойствами, определила в технике антенн СВЧ создание микрополосковых антенн с малой эффективной площадью рассеяния (ЭПР) на подложках из композиционных материалов (рис. 1). Микрополосковые антенны (МПА) обеспечивают высокую повторяемость размеров, низкую стоимость, малые металлоемкость, габаритные размеры, массу, рассеяние от сторонних РЛС [3, 6]. Для сравнения: турникетная антенна на полуволновых вибраторах с рефлектором имеет массу 200–300 г, аналогичная МПА с теми же электродинамическими характеристиками — на порядок меньше (приблизительно 30 г). Не менее показательны и габаритные параметры МПА, которые являются двумерными по своей конструкции, например, стандартный полуволновой микрополосковый излучатель занимает площадь примерно $0,25(\lambda \cdot \lambda)/\epsilon$ (λ — длина волны, ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость подложки). Площадь, занимаемая схемой питания (в плоскостном исполнении), равна $\approx 0,04(\lambda \cdot \lambda)/\epsilon$. Фазовращатель в фазированной антенной решетке (ФАР) обычно занимает площадь $0,1(\lambda \cdot \lambda)/\epsilon$.

МПА способны излучать поле с линейной, круговой и эллиптической поляризацией, допускают удоб-

ные конструктивные решения для обеспечения работы в двух- или многочастотных режимах, легко позволяют объединить многие элементарные излучатели в ФАР и разместить их на поверхностях сложной формы. Кроме того, МПА обладают высокими аэродинамическими, механическими и тем-



■ Рис. 1. Ленточный микрополосковый вибратор с конструктивными изменениями при использовании композита и получения малых характеристик рассеяния

пературными характеристиками. Они также могут быть использованы на самолетах, выполненных из композитов с малыми характеристиками рассеяния. Исследование этого и является основной задачей данной статьи.

Эффективность излучения и простота выполнения схемы возбуждения ставит полосковый вибратор на одно из первых мест по использованию при построении малогабаритных антенных систем. Вибраторы применяют и в качестве элементов микрополосковых антенных решеток. Известно большое число конкретных модификаций микрополосковых вибраторов (МПВ), однако для большинства из них излучающим элементом является отрезок открытой микрополосковой линии (МПЛ) — ленточный вибратор.

Проанализируем электрические характеристики ленточного вибратора, который можно рассматривать как модельную конструкцию для многих разновидностей МПВ.

Рассмотрим излучение МПВ (см. рис. 1) в виде отрезка МПЛ длиной b , шириной a , расположенного на слое экранированного s и l диэлектрика

$$J(y) = a_y \varphi(y)/a = a_y \cos(\beta y/b)/a, \quad (1)$$

где a_y — единичный вектор; β — постоянная распространения волны в МПЛ, отрезок которой образует МПВ.

Выражение (1) можно рассматривать как первое приближение для функции, описывающей истинное распределение тока на поверхности вибратора [1–4].

Диаграммы направленности (ДН) МПА могут быть определены стандартным методом: по известной силе тока на излучателе (1) рассчитывают электромагнитные поля, затем, если это удастся, производят разделение полей на распространяющиеся и затухающие, для первых устанавливается зависимость от угловых координат, т. е. ДН. Вычисление полей в дальней зоне ($R \gg \lambda$) производится обычно с использованием методов перевала или стационарной фазы. Здесь не рассматривается техника этих вычислений. Применения этого метода к родственным задачам можно найти, например, в работах [1–5].

Пользуясь методиками расчета характеристик полосковых антенн, приведенными в работах [1–4], запишем выражения для расчета диаграмм направленности с учетом зависимости $\varepsilon = f(y)$ (наличие композита):

В плоскости E ($\theta = \pi/2$; xoy):

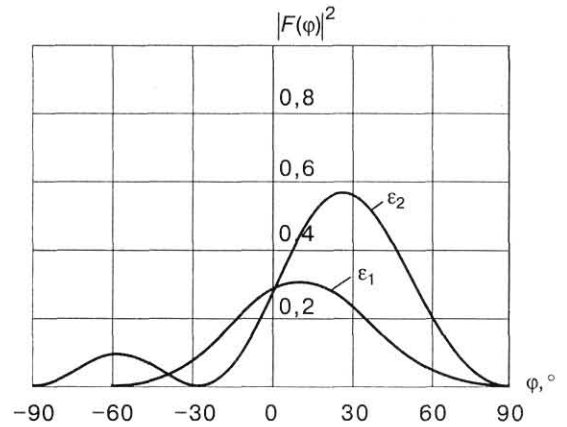
$$|F(\varphi)|^2 = \left(\beta \frac{\cos(0,5k_0 b \sin \varphi) - \cos(0,5\beta b)^2}{[\beta^2 - (k_0^2 \sin \varphi)^2] \sin(0,5\beta b)} \right)^2 \times \frac{(\xi \cos \varphi)^2}{\xi^2 + (\varepsilon \cos \varphi \operatorname{ctg} \xi k_0 d)^2}, \quad (2)$$

$\xi = \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \varphi}$, $\varepsilon = \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_0}$, $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$, $\varepsilon = \text{const}$ по z , $\varepsilon = f(y)$ («елочка»).

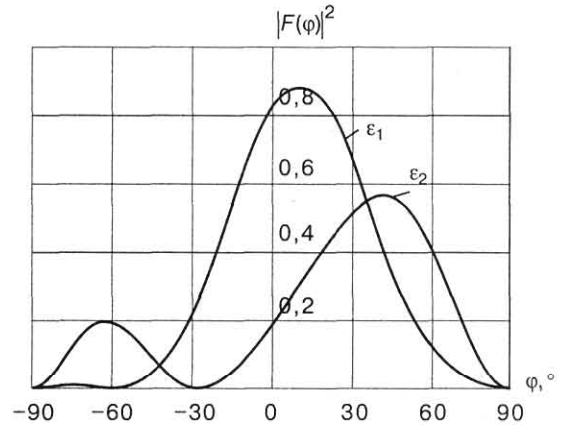
В плоскости H ($\varphi = 0$; zox):

$$|F(\theta)|^2 = \beta^2 \left(\frac{\sin(0,5k_0 a \cos \theta)}{0,5k_0 a \cos \theta} \right)^2 \times \frac{\sin^2 \theta}{\sin^2 \theta + (\xi \operatorname{ctg} \xi k_0 d)^2}, \quad (3)$$

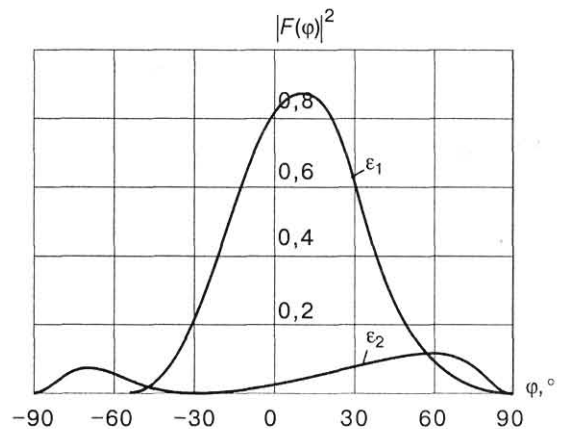
$$\xi = \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \theta}, \quad \varepsilon = \text{const} \text{ по } z \text{ и } y.$$



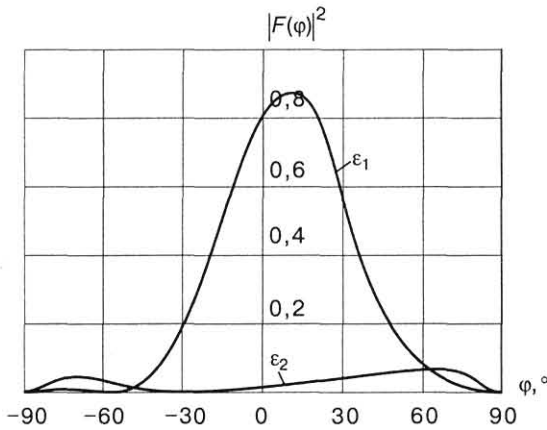
■ Рис. 2. ДН ленточного МПВ в E -плоскости при $d = 0,1$ см; $\varepsilon_1 = 2,54$; $\varepsilon_2 = 5$



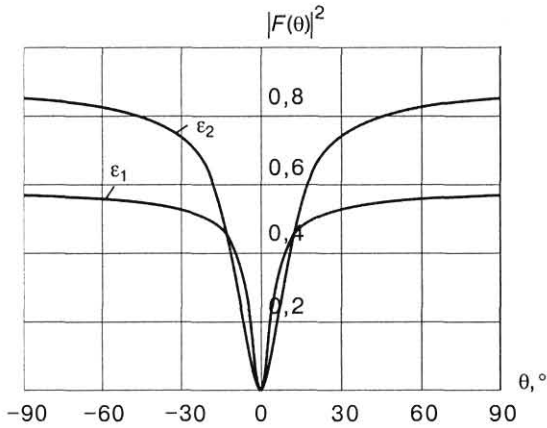
■ Рис. 3. ДН ленточного МПВ в E -плоскости при $d = 0,5$ см; $\varepsilon_1 = 2,54$; $\varepsilon_2 = 5$



■ Рис. 4. ДН ленточного МПВ в E -плоскости при $d = 1,5$ см; $\varepsilon_1 = 2,54$; $\varepsilon_2 = 5$



■ Рис. 5. ДН ленточного МПВ в E-плоскости при $d = 2$ см; $\epsilon_1 = 2,54$; $\epsilon_2 = 5$



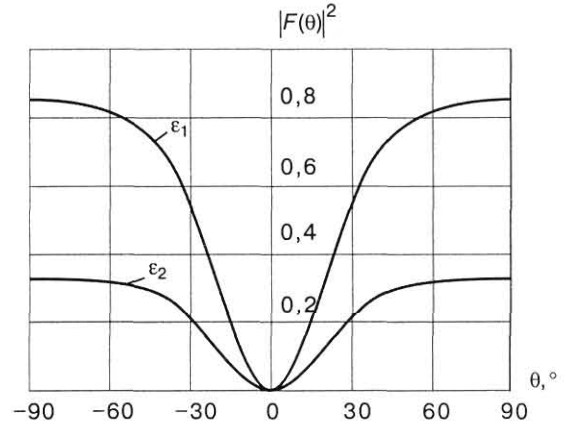
■ Рис. 6. ДН ленточного МПВ в H-плоскости при $d = 0,1$ см; $\epsilon_1 = 2,54$; $\epsilon_2 = 5$

На рис. 2–9 приведены диаграммы направленности ленточного микрополоскового вибратора (ЛМПВ) в E- и H-плоскостях; диаграммы рассчитаны по приведенным формулам при следующих данных: $\lambda = 3$ см; $a = 0,5$ см; $b = 1,5$ см; $d_1 = 0,1$ см; $d_2 = 0,5$ см; $d_3 = 1,5$ см; $d_4 = 2$ см; $\epsilon_1 = 2,54$; $\epsilon_2 = 5$; $\epsilon = e^{0,07y}$ по направлению оси y .

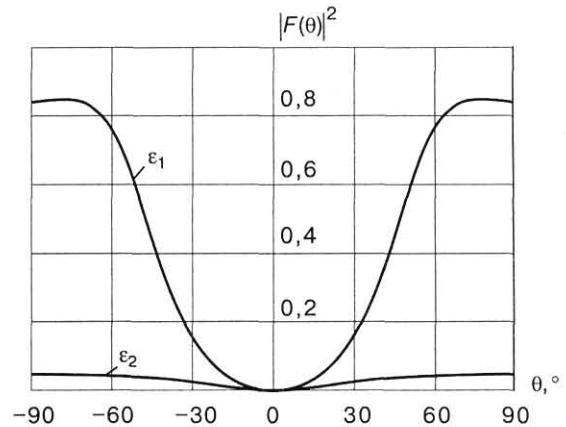
Как видно из рис. 2–5, ДН ЛМПВ в E-плоскости имеет ярко выраженный максимум. Причем при $d = 0,1$ см значение максимума ДН при $\epsilon = 5$ почти в два раза превышает максимальное значение ДН при $\epsilon = 2,54$, $\epsilon = f(y)$. Такая же картина наблюдается и в H-плоскости (см. рис. 6), при аналогичных значениях диэлектрической постоянной и толщины диэлектрического композита $\epsilon \neq f(y)$. Очевидно, что для данных размеров ЛМПВ при $\epsilon = 5$ и $d = 0,1$ см волна, излученная вибратором в композит, отразившись от нижней проводящей полоски ($c > a$, $l > b$) складывается в фазе с волной, излученной вибратором в свободное пространство, т. е. возникает резонанс излучения.

При сравнении графиков видно, что изменение толщины композита сильнее проявляется на ДН излучателя при больших значениях ϵ . Если при $d = 0,5$ см значения ДН излучателя для разных значений диэлектрической постоянной соизмеримы, то

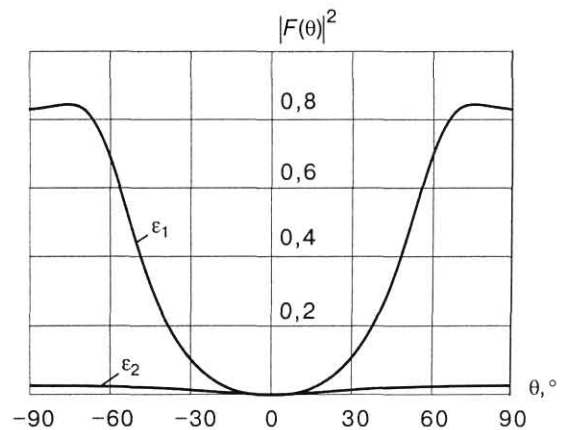
при $d = 2$ см максимум ДН ЛМПВ для $\epsilon = 2,54$ почти в 10 раз превышает максимальное значение ДН вибратора при $\epsilon = 5$ (см. рис. 4–5). Такая же ситуация и в H-плоскости. Причиной столь резкого изменения амплитуды являются поверхностные волны, об условиях возбуждения и существования которых изложено в работах [3, 5].



■ Рис. 7. ДН ленточного МПВ в H-плоскости при $d = 0,5$ см; $\epsilon_1 = 2,54$; $\epsilon_2 = 5$



■ Рис. 8. ДН ленточного МПВ в H-плоскости при $d = 1,5$ см; $\epsilon_1 = 2,54$; $\epsilon_2 = 5$



■ Рис. 9. ДН ленточного МПВ в H-плоскости при $d = 2$ см; $\epsilon_1 = 2,54$; $\epsilon_2 = 5$

Ширина ДН по уровню 0,707 ЛМПВ в E -плоскости практически не зависит от значений ϵ и d . В H -плоскости ширина ДН существенно зависит от значения d (для сравнения: $2\theta = 140^\circ$ при $d = 0,1$ см, а при $d = 2$ см $2\theta = 80^\circ$ (см. рис. 6–9)).

Возможность использования микрополосковых антенн для уменьшения характеристик рассеяния от сторонних РЛС, а также при их установке на летательных аппаратах из композитов следует из предварительных расчетов и измерений, проведенных в БЭК.

1. ЭПР полуволнового вибратора (направление от сторонней РЛС нормальное): $\sigma_1 = 0,86\lambda^2$. Для длины сторонней волны $\lambda = 3$ см $\sigma_1 = 7,74$ см²; $\lambda = 30$ см $\sigma_1 = 774$ см².

2. ЭПР ленточного микрополоскового полуволнового вибратора, площадь которого $S_1 = 0,25 \frac{\lambda^2}{\epsilon}$, вместе со схемой питания площадью $S_2 = 0,04 \frac{\lambda^2}{\epsilon}$ будет равна

$$\sigma_2 = 4\pi \frac{S^2}{\lambda^2}.$$

Можно показать, что в приближении нормального отражения сторонней волны от металлической площадки площадью $S = S_1 + S_2$:

$$\sigma_2 = \frac{4\pi}{\lambda^2} \left[0,25^2 \frac{\lambda^4}{\epsilon^2} + 0,04^2 \frac{\lambda^4}{\epsilon^2} \right] \approx 1,25 \frac{\lambda^2}{\epsilon^2}.$$

Для длины сторонней волны $\lambda = 3$ см, $\epsilon = 3$ $\sigma_2 = 1,25$ см²; $\lambda = 30$ см, $\epsilon = 3$ $\sigma_2 = 125$ см².

3. Определим, во сколько раз примерно уменьшилась ЭПР полуволнового вибратора в обычном и микрополосковом исполнении (относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 3$): ~8 дБ.

Используя полученные расчеты и графики (см. рис. 2–9), можно рекомендовать следующие конструктивные изменения в микрополосковом исполнении вибратора (см. рис. 1), которые экспериментально подтвердили уменьшение ЭПР до 13 дБ по сравнению с обычным вибратором (при этом интегральная площадь ДН уменьшилась на 8 %, измерение проводилось в БЭК на длине волны 3 см):

а) использовать композиционные материалы с $\epsilon \approx 3$, $\text{tg } \sigma < 0,001$ в качестве подложки $\epsilon = f(y)$;

б) запитку излучателя производить как можно ближе к полоске, что уменьшает потери за счет потерь в композите и РПМ экрана;

в) использовать РПМ вместо экрана композита, оставляя металлическую нижнюю полоску для запитки и излучателя на $0,2\lambda$ шире верхней;

г) производить запитку по направлению «елочки» композита, для стороннего поля РЛС, \vec{E} которого перпендикулярен к «елочке» композита;

д) плоский вибратор устанавливать по направлению «елочки» (оси y , $\epsilon = f(y)$);

е) использовать РПМ снаружи на расстоянии около $1,2\lambda$ от кромок нижней полоски;

ж) использовать в подложке металлические включения размером не более $\frac{\lambda}{30}$ и изрезанность N внешней металлической полосы вибратора $> N \frac{b}{12}$;

з) использовать тот факт, что наличие продольного распределения ϵ приводит в E -плоскости к смещению диаграммы направленности в положительном направлении оси y .

Работа выполнена в рамках гранта Т02-02,5-3650 Минобразования РФ (конкурс 2002 г.) по фундаментальным исследованиям в области технических наук.

Литература

1. Нефедов Е. И., Фиалковский А. Т. Полосковые линии передачи: Электродинамические основы автоматизированного проектирования интегральных схем СВЧ. — М.: Наука, 1980. — 170 с.
2. Гвоздев В. И., Нефедов Е. И. Объемные интегральные схемы СВЧ. — М.: Наука, 1985. — 230 с.
3. Панченко Б. А., Нефедов В. И. Микрополосковые антенны. — М.: Радио и связь, 1986. — 120 с.
4. Коваленко Ю. Ф., Нефедов В. И., Советов В. Н. Микрополосковые антенны СВЧ. Обзор, модели, анализ, синтез. — В кн.: Машинное проектирование устройств СВЧ. — Тбилиси, 1979. — 240 с.
5. Красюк В. Н. Антенны СВЧ с диэлектрическим покрытием. — Л.: Судостроение, 1986. — 210 с.
6. Красюк В. Н., Михайлов В. Ф. Бортовые антенны гиперзвуковых летательных аппаратов. — СПб.: СПбГААП, 1994. — 216 с.