

УДК 621.372.8.040.35.017.7

## ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦІЯ РЕЗОНАНСНОЇ ЧАСТОТИ МИКРОПОЛОСКОВИХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

**И. В. Горбач<sup>1</sup>, Н. Н. Горобец<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> ГП «Укркосмос»,  
пр. Перемоги, 37 (корп. 28), Киев, 03056, Украина  
E-mail: ivgorbach@gmail.com

<sup>2</sup> Харьковський національний університет ім. В. Н. Каразіна,  
пл. Свободи, 4, Харків, 61077, Украина  
E-mail: Nikolay.N.Gorobets@univer.kharkov.ua  
Поступила в редакцію 16 апреля 2010 г.

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований возможностей термостабилизации резонансной частоты микрополосковых антенн путем использования двухслойных диэлектрических подложек с противоположными по знаку и близкими по величине температурными коэффициентами изменения диэлектрической проницаемости. Определены оптимальные соотношения между толщиной слоев в составной двухслойной подложке. Показано, что в экспериментальном излучателе с термокомпенсацией при изменении температуры от  $-50$  до  $+80^{\circ}\text{C}$  отклонение резонансной частоты в оптимальном варианте не превышает  $0,1\%$

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** микрополосковая резонансная антенна, термостабилизация, термокомпенсация, диэлектрическая проницаемость, подложка, резонансная частота

Приведені результати теоретичних і експериментальних досліджень можливостей термостабілізації резонансної частоти мікросмужкових антен шляхом використання двохшарових діелектричних підкладок з протилежними по знаку і близькими за величиною температурними коефіцієнтами зміни діелектричної проникності. Визначені оптимальні співвідношення між товщиною шарів в складеній двохшаровій підкладці. Показано, що в експериментальному випромінювачі з термокомпенсацією при зміні температури від  $-50$  до  $+80^{\circ}\text{C}$  відхилення резонансної частоти в оптимальному варіанті не перевищує  $0,1\%$

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** мікросмужкова резонансна антена, термостабілізація, термокомпенсація, діелектрична проникність, підкладка, резонансна частота

The results theoretical and experimental researches of opportunities thermostabilization of resonant frequency microstrip antennas are given by use two-layer dielectric of substrates with opposite on a symbol and temperature factors, close on size, dielectric of permeability. The optimum ratio between the thickness of layers in a composite two-layer substrate are given. It is shown that the experimental oscillator with temperature compensation for temperature changes from  $-50$  to  $+80^{\circ}\text{C}$  the deviation of resonance frequency in the optimal variant is less than  $0,1\%$

**KEYWORDS:** microstrip resonant antenna, thermostabilization, temperature compensation, dielectric permeability, substrate, resonant frequency

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в системах радиосвязи находят широкое применение микрополосковые резонансные антенные элементы. Например, при создании малогабаритных приемо-передающих устройств в качестве антенн могут использоваться слабонаправленные микрополосковые излучатели или остронаправленные (в частности, фазированные) антенные решетки в планарном или конформном исполнении [1].

Полоса пропускания микрополосковых резонансных устройств обычно составляет от долей до единиц процентов. При узкой полосе пропускания даже незначительное смещение резонансной частоты приводит к снижению надежности и значительному ухудшению качества работы всей радиоэлектронной системы. Расстройка и нестабильность резонансной частоты микрополоскового резонансного элемента может быть вызвана изменением его температурного режима за счет воздействия тепла от работающих активных приборов и изменения температуры окружающей среды. Таким образом, на практике возникает необходимость термостабилизации резонансной частоты микрополосковых резонансных устройств.

Целью настоящей статьи является теоретическое и экспериментальное исследование возможностей термостабилизации резонансной частоты микрополосковых излучателей и резонаторов микроволнового диапазона путем использования двухслойных диэлектрических подложек с термокомпенсацией за счет подбора диэлектриков с противоположными по знаку температурными коэффициентами изменения диэлектрической проницаемости.

### АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ РЕЗОНАНСНОЙ ЧАСТОТЫ В МИКРОПОЛОСКОВЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЯХ

При изменении температуры окружающего пространства и следовательно, температуры микрополоскового резонансного излучателя или резонатора микроволнового диапазона неизбежно изменяются его линейные размеры. Если диэлектрическая проницаемость подложки с увеличением температуры уменьшается (и растет с уменьшением температуры), то изменение резонансной частоты микрополоскового элемента за счет теплового расширения его металлического слоя может быть скомпенсировано. Однако, синтез диэлектриков с заданной зависимостью температурного коэффициента изменения диэлектрической проницаемости  $\text{TK}_{\varepsilon}$  от температуры встречает большие трудности. Поэтому более перспективным представляется использование композиционных многослойных диэлектрических подложек. Так, например, если подложку выполнить двухслойной, причем диэлектрики в этих слоях выбрать такими, чтобы температурные коэффициенты изменения их диэлектрических проницаемостей  $\text{TK}_{\varepsilon_1}$  и  $\text{TK}_{\varepsilon_2}$  имели противоположные знаки, то при надлежащем выборе соотношения толщин слоев можно обеспечить термостабильность резонансной частоты микрополоскового элемента.

Действительно, при таком подборе диэлектриков с изменением температуры происходит взаимная компенсация изменений их диэлектрических постоянных. При этом всегда можно подобрать такие серийно выпускаемые промышленностью диэлектрики, которые бы обеспечили компенсацию температурных изменений диэлектрической постоянной составной подложки и линейных размеров образца.

Рассмотрим возможности применения этого способа на примере прямоугольного резонансного микрополоскового излучателя, эскиз которого представлен на рис. 1. Обычно подобные излучатели работают на низшей резонансной частоте, когда они имеют минимальные размеры, причем, длина

элемента по оси  $x$  примерно равна половине длины волны в диэлектрической подложке. При этом резонансная частота [1]

$$f_0 = c / 2\sqrt{\varepsilon_{ef}} L + 2\Delta L, \quad (1)$$

где  $c$  — скорость света в вакууме;  $L$  — длина элемента;  $\Delta L$  — эффективное удлинение элемента;  $\varepsilon_{ef}$  — эффективная диэлектрическая проницаемость подложки.

В свою очередь величины  $\Delta L$ , и  $\varepsilon_{ef}$  выражаются в следующем виде:

$$\Delta L = 0,412h \left( \frac{\varepsilon_{ef} + 0,3}{\varepsilon_{ef} - 2,258} \right) \left( \frac{w/h + 0,262}{w/h + 0,813} \right), \quad (2)$$

$$\varepsilon_{ef} = 0,5 \varepsilon + 1 + 0,5 \varepsilon - 1 \cdot 1 + 12h/w^{-1/2}. \quad (3)$$

Здесь  $w$  — ширина элемента;  $h$  — высота диэлектрической подложки;  $\varepsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость подложки.

Для составной подложки выражения (1) — (3) преобразуются с учетом изменения выражения для  $\varepsilon_{\text{эфф}}$ , которое в статическом приближении можно определить на основании логарифмического закона смешения [2]:

$$\varepsilon_{\Sigma} = \sum_{v=1}^2 \theta_v \varepsilon_v^{\alpha} \quad (4)$$

где  $\varepsilon_{\Sigma}$ ,  $\varepsilon_v$  — относительная диэлектрическая проницаемость сложной подложки и отдельных слоев соответственно;  $\theta_v$  — объемные концентрации слоев, удовлетворяющих соотношению  $\theta_1 + \theta_2 = 1$ ;  $\alpha$  — постоянная, характеризующая распределение компонентов диэлектрика и принимающая значения от -1 до +1.

Таким образом, эффективная диэлектрическая проницаемость подложки с учетом формулы (4) равна

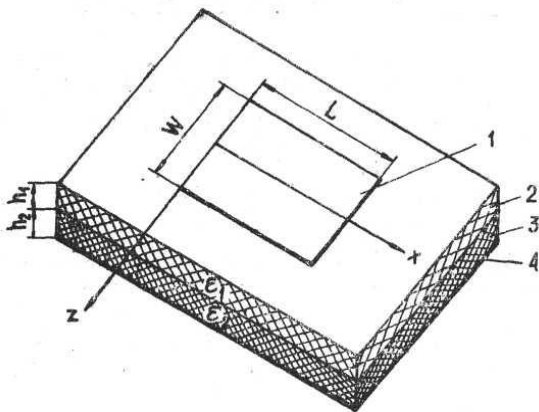


Рис. 1. Микрополосковый излучатель на двухслойной подложке:

- 1 — резонансный элемент;
- 2, 3 — диэлектрические подложки с диэлектрическими проницаемостями  $\varepsilon_1$ , и  $\varepsilon_2$ ;
- 4 — экранирующая пластина

$$\varepsilon_{ef} = \frac{0,5}{\varepsilon_1 h_2 + \varepsilon_2 h_1} \left[ \varepsilon_1 h_2 \varepsilon_2 + 1 + \varepsilon_2 h_1 \varepsilon_1 + 1 + \right. \\ \left. + 1 + 12h/w^{-1/2} \cdot \varepsilon_2 h_1 \varepsilon_1 - 1 + \varepsilon_1 h_2 \varepsilon_2 - 1 \right], \quad (5)$$

где  $h = h_1 + h_2$ ,  $\alpha = -1$ .

Температурный коэффициент изменения частоты резонансного элемента

$$\text{TK}f_0 = \frac{1}{f_0} \frac{df_0}{dT}, \quad (6)$$

где  $f_0$  — резонансная частота в исследуемой точке температурного диапазона.

С учетом формул (1) — (5) выражение (6) для элемента с однослойной подложкой примет вид:

$$\text{TK}f_1 = \frac{1}{\sqrt{1-12h/w}} \left[ \frac{0,4598h}{L+2\Delta L} \frac{\left( \frac{w/h+0,262}{w/h+0,813} \right) - \frac{1}{2\varepsilon_{ef}}}{\varepsilon_{ef} - 0,258} \right] \times \\ \times \left[ 0,5\varepsilon \text{TK}_{\varepsilon} \frac{1+\sqrt{1+12h/w}}{w} - \frac{3h \varepsilon - 1}{1+12h/w} \frac{\text{TK}l_h - \text{TK}l_w}{L+2\Delta L} \right]. \quad (7)$$

Здесь  $\text{TK}l_h$  — температурный коэффициент линейного расширения материала подложки;  $\text{TK}l_w$  — температурный коэффициент линейного расширения металла резонансного элемента.

Для составной полужки

$$\text{TK}f_{\Sigma} = \left[ \frac{0,4598h}{L+2\Delta L} \frac{\left( \frac{w/h+0,262}{w/h+0,813} \right) - \frac{1}{2\varepsilon_{ef\Sigma}}}{\varepsilon_{ef\Sigma} - 0,258} \right] \times \\ \times \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{2\sqrt{1+12h/w}} \frac{1+\sqrt{1+12h/w}}{\varepsilon_1 h_2 + \varepsilon_2 h_1} \left[ h(\varepsilon_1 h_2 \text{TK}_{\varepsilon_2} + \varepsilon_2 h_1 \text{TK}_{\varepsilon_1}) + \right. \\ \left. + h_1 h_2 (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) (\text{TK}l_{h_1} - \text{TK}l_{h_2}) \right] - \frac{3 \varepsilon_1 h_2 \varepsilon_2 - 1 + \varepsilon_2 h_1 \varepsilon_1 - 1}{w\sqrt{1+12h/w} (1+12h/w) (\varepsilon_1 h_2 + \varepsilon_2 h_1)} \times \\ \times \left[ h_1 (\text{TK}l_{h_1} - \text{TK}l_w) + h_2 (\text{TK}l_{h_2} - \text{TK}l_w) \right] - \frac{L \text{TK}l_w}{L+2\Delta L}, \quad (8)$$

причем как в уравнении (7), так и в уравнении (8) не учтено слагаемое  $\frac{df_0}{d(\Delta L)} \times \frac{d(\Delta L)}{dT}$  ввиду его малости.

Условие полной термостабилизации микрополоскового резонансного элемента:

$$\text{TK}f_{\Sigma} = 0, \quad (8a)$$

причем  $|\text{TK}_{\varepsilon_1}| < |\text{TK}_{\varepsilon_2}|$ , если  $\text{TK}_{\varepsilon_2}$  — отрицателен.

Таким образом, в соответствии с выражением (8a), можно добиться такого соотношения между величинами  $\varepsilon_1(T)$ ,  $\varepsilon_2(T)$ ,  $h_1(T)$  и  $h_2(T)$ , при котором резонансная частота практически не будет зависеть от температуры. При использовании серийно выпускаемых промышленностью диэлектрических пластин ввиду малых возможностей варьирования их по толщине реализовать такую возможность не всегда удастся, но всегда достаточно просто достичь такого минимального значения  $\text{TK}f_{\Sigma}$ , которое удовлетворяло бы требованиям к устройству по стабильности резонансной частоты. Необходимо заметить, что условие (8a) имеет смысл в одной точке температурного диапазона. Поэтому, чтобы получить соотношение величин  $\varepsilon_1(T)$ ,  $\varepsilon_2(T)$ ,  $h_1(T)$ ,  $h_2(T)$ , обеспечивающее необходимую термостабильность резонансной частоты в заданном диапазоне температур, нужно это соотношение определять по крайней мере в крайних точках температурного диапазона.

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ С ОДНОСЛОЙНОЙ ПОДЛОЖКОЙ

Для экспериментальных исследований микрополосковые резонансные элементы изготавливались на диэлектрических подложках из поликора и ФЛАН-10, широко используемых в настоящее время в микроволновом диапазоне. Результаты исследований температурной зависимости резонансной частоты этих элементов представлены на рис. 2.

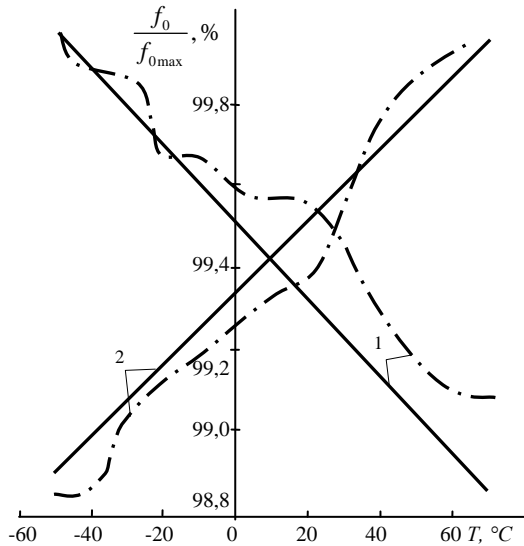


Рис. 2. Зависимость резонансной частоты микрополосковых излучателей от температуры: 1 – на поликоровой подложке; 2 – на подложке из диэлектрика ФЛАН-10; — теоретическая; - - - экспериментальная

зависимости близки к линейным. Поэтому естественно аппроксимировать экспериментальные данные линейной функцией и проводить анализ уже линейных зависимостей  $\varepsilon(T)$  и  $f_0(T)$ . Аппроксимация проводилась методом наименьших квадратов [3]. С учетом формулы (9) были рассчитаны  $TK_{\varepsilon_1}$  и  $TK_{\varepsilon_2}$  во всем рассматриваемом диапазоне температур. Теоретические зависимости 1 и 2 были рассчитаны с учетом того, что

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \varepsilon_{20^\circ\text{C}} \left[ 1 + TK_{\varepsilon} (T - T_0) \right], \\ h &= h_{20^\circ\text{C}} \left[ 1 + TKI_h (T - T_0) \right], \\ L = w &= L_{20^\circ\text{C}} \left[ 1 + TKI_w (T - T_0) \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

где  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ .

Это линейное приближение в теоретических расчетах, как подтверждает эксперимент (рис. 2), является удовлетворительным.

На рис. 3 представлены зависимости смещения резонансной частоты в диапазоне температур относительно  $f_0(20^\circ\text{C})$ . Из рисунка видно, что уход частоты при изменении температуры является существенным и недопустимым для многих применений резонансных излучателей и, в частности, для микрополосковых антенн. По формуле (7) и с учетом (10) рассчитан температурный коэффициент изменения частоты резонансных элементов на поликоровой подложке

Исследования проводились в диапазоне температур от  $-50^\circ\text{C}$  до  $+80^\circ\text{C}$ . Измерения резонансной частоты проводились известными методами с использованием камеры климатических испытаний типа 12КТХ — 0,063. Из рис. 2 виден заметный уход резонансной частоты элементов в диапазоне температур, причем направление изменения частоты от температуры противоположно для разных подложек. При этом поликор имеет  $TK_{\varepsilon_1} > 0$ , а ФЛАН-10 имеет  $TK_{\varepsilon_2} < 0$ . Из анализа крутизны соответствующих зависимостей можно сделать вывод, что  $TK_{\varepsilon_2} > TK_{\varepsilon_1}$ . Величина температурного коэффициента изменения диэлектрической проницаемости также изменяется в диапазоне температур. Поскольку величина  $TK_{\varepsilon}$  определяется как

$$TK_{\varepsilon} = \frac{1}{\varepsilon} \frac{d\varepsilon}{dT}, \quad (9)$$

то необходимо знать функцию  $\varepsilon(T)$ , чтобы определить  $TK_{\varepsilon}$ . Из выражений (1) — (3) методом деления отрезка пополам [3] были рассчитаны функции  $\varepsilon_1(T)$  и  $\varepsilon_2(T)$  (значения  $f_0$  брались из эксперимента).

Как видно из рис. 2, экспериментальные зависимости близки к линейным. Поэтому естественно аппроксимировать экспериментальные данные линейной функцией и проводить анализ уже линейных зависимостей  $\varepsilon(T)$  и  $f_0(T)$ . Аппроксимация проводилась методом наименьших квадратов [3]. С учетом формулы (9) были рассчитаны  $TK_{\varepsilon_1}$  и  $TK_{\varepsilon_2}$  во всем рассматриваемом диапазоне температур. Теоретические зависимости 1 и 2 были рассчитаны с учетом того, что

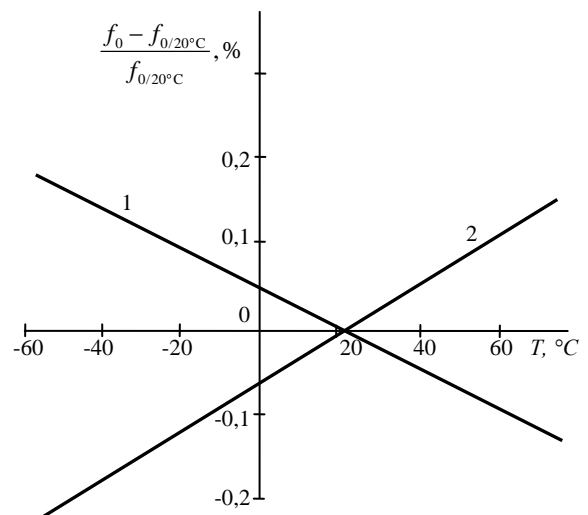


Рис. 3. Смещение резонансной частоты микрополоскового излучателя в диапазоне температур: 1 — излучатель на поликоровой подложке; 2 — излучатель на диэлектрике ФЛАН-10

$\text{TK}f_1 + 70^\circ\text{C} = -9,295 \times 10^{-5} \frac{1}{^\circ\text{C}}$ , на подложке из ФЛАН-10  $\text{TK}f_2 + 60^\circ\text{C} = 9,0 \times 10^{-5} \frac{1}{^\circ\text{C}}$ .

Аппроксимировав линейной функцией экспериментальные функции  $f_0(T)$ , с учетом выражения (6) получим экспериментальные значения

$$\text{TK}f_1 + 70^\circ\text{C} = -8,811 \times 10^{-5} \frac{1}{^\circ\text{C}},$$

$$\text{TK}f_2 + 60^\circ\text{C} = 1,04 \times 10^{-4} \frac{1}{^\circ\text{C}}.$$

Из сравнения теоретических и экспериментальных данных видно, что значения  $\text{TK}f_0$  достаточно близки, что подтверждает пригодность формулы (7) для расчетов  $\text{TK}f_0$  прямоугольных резонансных излучателей. Отметим, что при незначительном уменьшении точности формула (7) упрощается:

$$\text{TK}f_0 = -\frac{\varepsilon \text{TK}_\varepsilon \frac{1 + \sqrt{1 + 12h/w}}{2} - \frac{L \text{TK}l_w}{L + 2\Delta L}}{\left[ \varepsilon \frac{1 + \sqrt{1 + 12h/w}}{2} + \frac{1 + \sqrt{1 + 12h/w}}{2} - 1 \right]} \quad (11)$$

При этом  $\text{TK}f_1/ + 70^\circ\text{C} = -9,399 \times 10^{-5} \frac{1}{^\circ\text{C}}$ , что отличается от предыдущего расчета на 1,1%.

#### ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЗОНАНСНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ СО СЛОЖНОЙ ПОДЛОЖКОЙ

Из приведенных выше результатов исследований резонансных излучателей с различными однослойными подложками видно, что скомпенсировать смещение резонансной частоты микрополоскового излучателя на подложке из диэлектрика ФЛАН-10 можно при использовании подложки из поликора. Были экспериментально исследованы различные комбинации по толщине слоев двухслойной подложки. Оказалось, что для компенсации температурных изменений диэлектрической проницаемости поликора и изменения линейных размеров необходимо, чтобы объемная концентрация диэлектрика

ФЛАН-10 была большей. На рис. 4 представлены зависимости резонансной частоты  $f_0$  излучателей на сложной подложке.

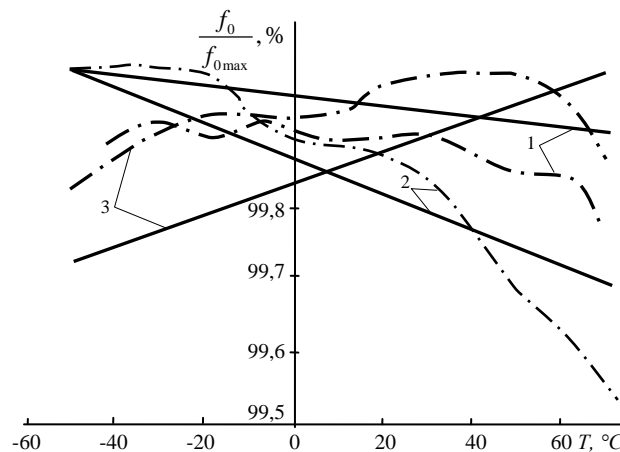


Рис. 4. Зависимость резонансной частоты от температуры микрополоскового излучателя на составной подложке

- 1- $h_1 = 1$  мм,  $h_2 = 1$  мм,  $L = w = 25$  мм;
- 2- $h_1 = 2$  мм,  $h_2 = 1$  мм,  $L = w = 27$  мм;
- 3- $h_1 = 1$  мм,  $h_2 = 2$  мм,  $L = w = 31,5$  мм;
- теоретическая; - - - экспериментальная

Исследования проводились в том же диапазоне температур. Теоретические зависимости рассчитывались без учета влияния прослойки клея скрепляемых слоев. Из рис. 4 виден эффект

термостабилизации резонансной частоты элемента на составной подложке: при изменении температуры от  $-50^{\circ}\text{C}$  до  $+80^{\circ}\text{C}$  отклонение резонансной частоты экспериментального излучателя не превышает  $0,1\%$ .

Изменение резонансной частоты излучателя с разными толщинами слоев подложки в диапазоне температур представлено на рис. 5.

Из проведенных исследований видно, что смещение резонансной частоты в диапазоне температур существенно зависит от отношения толщин слоев.

На рис. 6 представлена зависимость, показывающая величину смещения резонансной частоты микрополоскового излучателя на составной подложке. Результаты, представленные на рисунке, позволяют определить оптимальное отношение толщин слоев составной подложки резонансного излучателя при заданной температуре  $70^{\circ}\text{C}$  и могут быть обобщены для других температур.

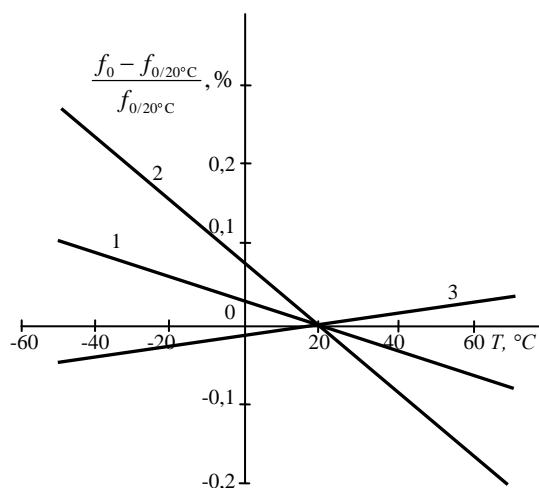


Рис 5. Смещение резонансной частоты излучателя на двухслойной подложке:  
1 -  $h_1:h_2 = 1$ ; 2 -  $h_1:h_2 = 2$ ; 3 -  $h_1:h_2 = 0,5$

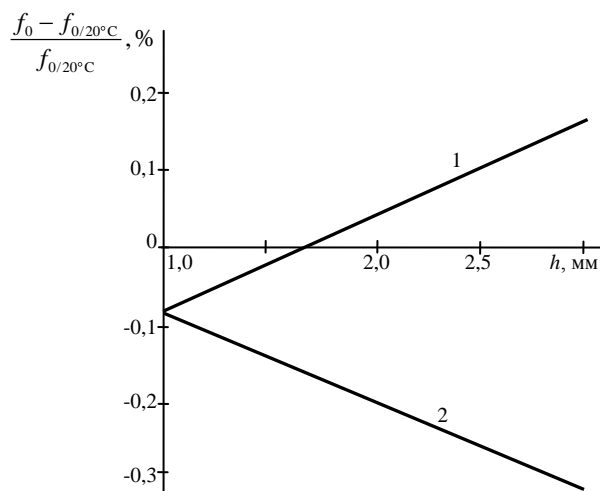


Рис 6. Зависимость изменения резонансной частоты излучателя на двухслойной подложке от толщины слоев при  $T = 70^{\circ}\text{C}$  ( $h = h_1 + h_2$ ):  
1 -  $h_1 = 1\text{мм}$ ; 2 -  $h_2 = 1\text{мм}$

## ВЫВОДЫ

1. Предложен и исследован метод термокомпенсации расстройки резонансной частоты микрополосковых антенн путем использования двухслойных составных подложек из разных диэлектриков с противоположными по знаку температурными коэффициентами изменения диэлектрической проницаемости. Определены оптимальные соотношения между толщинами слоев составной подложки микрополоскового резонансного антенного элемента, который обеспечивает термостабилизацию резонансных микрополосковых слабонаправленных антенн, излучателей микрополосковых антенных решеток либо других микрополосковых резонансных элементов.

2. Показано, что применяемые в настоящее время в микроволновом диапазоне подложки из диэлектриков ФЛАН-10 и поликора являются термокомпенсаторами друг друга.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bahl J. Build Microstrip Antennas with Paper-Thin Dimensions.— *Microwaves*, 1979, 18, № 10, pp. 50-51, 55, 57, 59, 61, 63.
2. Богородицкий Н. П., Пасынков В. В., Тареев Б. М. Электротехнические материалы.— Л.: Энергия, 1977, с. 352.
3. Калиткин Н. Н. Численные методы.— М.: Наука, 1978, 511с.