

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА МНОГОДИАПАЗОННОЙ АНТЕННЫ

Нудьга А.А.

Севастопольский национальный технический университет
г. Севастополь, Украина

Антенное устройство — неотъемлемая составляющая любой приемопередающей системы использующей радиоканал для передачи данных. По ряду причин невозможно построить антенну, способную работать во всем освоенном частотном диапазоне. Поэтому, для каждого стандарта передачи данных (*GSM, CDMA, UMTS, Wi-Fi* и др.) необходима антенна, уровень согласования которой будет приемлемым для использования. Применение отдельных антенн обычно не целесообразно из-за увеличения массогабаритных характеристик и усложнения конструкции питающего тракта. Решением может быть использование многодиапазонных антенн. Подробное исследование свойств, сложных антенн, последнее время проводилось с помощью программных продуктов [1]. В связи с этим определен интерес представляет аналитический подход к решению задачи нахождения электрической составляющей поля в дальней зоне.

Основная часть

Рассмотрим геометрию многодиапазонной антенны, основанную на фрактальной салфетке Серпинского, и упростим ее конструкцию, исключив из верхней (низкочастотной) области отверстия, резонирующие на более высоких частотах. Первая фрактальная итерация структуры показана на рис. 1.

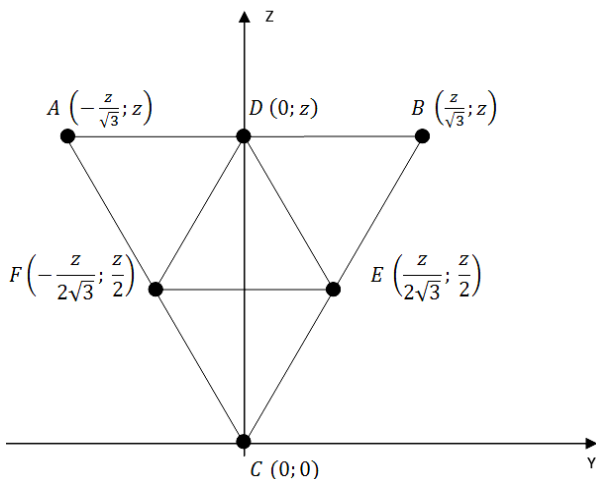


Рис. 1. Фрактальная салфетка Серпинского

Треугольники *ADF, DBE, FEC* выполнены из металла, а треугольник *FDE* представляет отверстие треугольной формы. Возбуждение структуры обеспечивается подключением внешнего источника в точке *C*. Современные методы нахождения поля в дальней зоне зачастую сводятся к моделированию систем в пакетных продуктах. Электродинамические методы, использованные в программах, не всегда доступны пользователю и

понятны физически. Поэтому рассмотрим метод определения поля излучения антенны, основанный на решении системы уравнений с неизвестными

токами, текущими по ее поверхности.

Разобьем каждый металлический треугольник на элементарные площадки, в пределах которых ток будем считать постоянным и линейно поляризованным (далее рассмотрим случай ориентации элементарных токов вдоль оси Z). Высота элементарных площадок (треугольников) вдоль оси OZ равна l , величина высоты определяется исходя из условия: $l < \lambda/16$, где λ - длина волны возбуждающего поля [2]. Геометрия задачи показана на рис. 2.

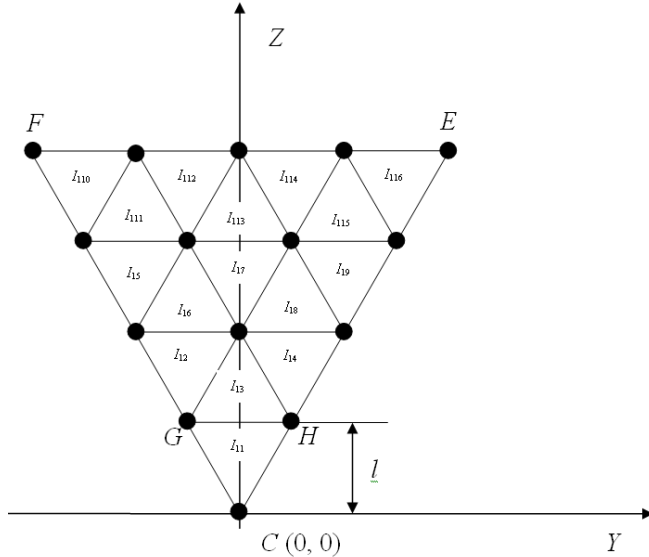


Рис. 2

В пределах условно элементарной площадки CGH ток постоянен и равен величине I_{11} . Необходимо найти напряженность электрического поля в точке наблюдения M , расположенной в дальней зоне треугольника ABC (и элементарных площадок). По известной плотности токов в каждой точке антенны, можно рассчитать электромагнитное поле ее излучения [2]. Предположим, что токи $I_{11} \dots I_{ij}$ нам известны, тогда, зная их

для каждого элементарного излучателя, определим напряженность электрического поля от каждой элементарной площадке по формуле [3]:

$$E(r, \vartheta) = I_{ct} \cdot \frac{\tilde{k}^2 Z_B l}{4\pi} \left\{ \begin{array}{l} 2 \left[\frac{1}{(\tilde{k}r)^2} + \frac{1}{(\tilde{k}r)^3} \right] \cos \vartheta e_r + \\ + \left[\frac{1}{\tilde{k}r} + \frac{1}{(\tilde{k}r)^2} + \frac{1}{(\tilde{k}r)^3} \right] \sin \vartheta e_\vartheta \end{array} \right\} e^{-\tilde{k}r}, \quad (1)$$

где $Z_B = \sqrt{\tilde{\mu}_a / \tilde{\epsilon}_a} = \frac{\tilde{k}}{i\omega \tilde{\epsilon}_a} \approx \frac{k}{\omega \epsilon_a}$ — волновое сопротивление среды;

$\tilde{k} = k_\alpha + ik_\beta = i\omega \sqrt{\tilde{\mu}_a / \tilde{\epsilon}_a}$ — коэффициент распространения волны в среде;

$\tilde{\epsilon}_a = \epsilon_a' - i\epsilon_a'' = \epsilon_a' - i \left(\epsilon_a' \text{tg} \delta + \frac{\sigma}{\omega} \right) = \epsilon_{ad}'' - i \frac{\sigma}{\omega}$ — комплексная диэлектрическая проницаемость;

$\tilde{\mu}_a = \mu_a' - i\mu_a'' = \mu_a' (1 - i \text{tg} \delta^m) = \epsilon_{ad}'' - i \frac{\sigma}{\omega}$ — комплексная магнитная проницаемость;

l — длина элементарного излучателя; I_{ct} — ток неизменный по длине l ; r — расстояние элементарного излуча-

теля до точки наблюдения М; $k_\alpha = \operatorname{Re} \tilde{k}$ — коэффициент затухания волны в среде; $k_\beta = \operatorname{Im} \tilde{k}$ — коэффициент фазы волны в среде.

Рассмотрим среду без потерь, тогда $k_\alpha = 0$ и $\tilde{k} = ik_\beta = ik$. Далее упростим выражение (1) и приведем его к виду

$$E(r, \vartheta) = I_{ct} \cdot \frac{k^2 Z_{Bl}}{4\pi} \left\{ \begin{array}{l} 2 \left[\frac{1}{(kr)^2} - \frac{1}{i(kr)^3} \right] \cos \vartheta e_r + \\ + \left[\frac{1}{ikr} + \frac{1}{(kr)^2} - \frac{1}{i(kr)^3} \right] \sin \vartheta e_\vartheta \end{array} \right\} e^{-ikr}. \quad (2)$$

Уравнение (2) справедливо для сферической системы координат, применив формулы перехода (3) и график рис. 3 можно перейти к декартовым координатам.

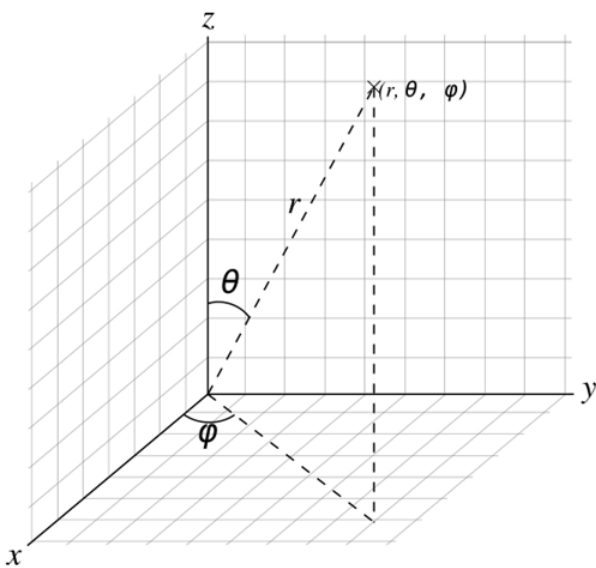


Рис. 3

Соотношение (2) позволяет определить напряженность электрического поля $E(r, \vartheta)$ в сферической системе координат (r, ϑ, φ) . Однако, дальнейшее рассмотрение удобно проводить в декартовой системе координат. В связи с этим определим составляющие напряженности электрического поля $E(x, y, z)$ в декартовой системе координат с помощью соотношения:

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} = T \begin{pmatrix} E_r \\ E_\vartheta \\ E_\varphi \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где T — преобразующая матрица из сферической системы в декартовую (см. рис. 3), определяемая как

$$T = \begin{pmatrix} \sin \vartheta \cos \varphi & \cos \vartheta \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \vartheta \sin \varphi & \cos \vartheta \sin \varphi & \cos \vartheta \\ \cos \vartheta & -\sin \vartheta & 0 \end{pmatrix}.$$

Подставляя (3) в (2) и преобразовывая, получаем выражение для расчета напряженности электрического поля $E(x, y, z)$ в декартовой системе координат:

$$\begin{aligned}
 E(r_k^l, \vartheta_k^l, \phi_k^l) = & \left\{ \begin{aligned} & I_{ctk}^l \cdot \frac{k^2 Z_B^l}{4\pi} 2 \left[\frac{1}{(kr_k^l)^2} - \frac{1}{i(kr_k^l)^3} \right] \times \\ & \times \cos \vartheta_k^l \sin \vartheta_k^l \cos \phi_k^l \cdot e^{-ikr_k^l} + \\ & + I_{ctk}^l \cdot \frac{k^2 Z_B^l}{4\pi} \left[\frac{1}{ikr_k^l} + \frac{1}{(kr_k^l)^2} - \frac{1}{i(kr_k^l)^3} \right] \times \\ & \times \sin \vartheta_k^l \cos \vartheta_k^l \cos \phi_k^l \cdot e^{-ikr_k^l} \end{aligned} \right\} \cdot e_x + \\
 + & \left\{ \begin{aligned} & I_{ctk}^l \cdot \frac{k^2 Z_B^l}{4\pi} 2 \left[\frac{1}{(kr_k^l)^2} - \frac{1}{i(kr_k^l)^3} \right] \cos \vartheta_k^l \sin \vartheta_k^l \sin \phi_k^l \cdot e^{-ikr_k^l} + \\ & + I_{ctk}^l \cdot \frac{k^2 Z_B^l}{4\pi} \left[\frac{1}{ikr_k^l} + \frac{1}{(kr_k^l)^2} - \frac{1}{i(kr_k^l)^3} \right] \sin \vartheta_k^l \cos \vartheta_k^l \sin \phi_k^l \cdot e^{-ikr_k^l} \end{aligned} \right\} \cdot e_y + \\
 + & \left\{ \begin{aligned} & I_{ctk}^l \cdot \frac{k^2 Z_B^l}{4\pi} 2 \left[\frac{1}{(kr_k^l)^2} - \frac{1}{i(kr_k^l)^3} \right] \cos \vartheta_k^{l2} \cdot e^{-ikr_k^l} - \\ & - I_{ctk}^l \cdot \frac{k^2 Z_B^l}{4\pi} \left[\frac{1}{ikr_k^l} + \frac{1}{(kr_k^l)^2} - \frac{1}{i(kr_k^l)^3} \right] \sin \vartheta_k^2 \cdot e^{-ikr_k^l} \end{aligned} \right\} \cdot e_z \quad (4)
 \end{aligned}$$

Чтобы найти общее поле антенны, необходимо, зная напряженность поля от каждого элементарного излучателя, сложить их в точке наблюдения

$$E_{\Sigma} = \sum_{m=1}^n E_m,$$

где m — номер элементарной площадки; n — количество площадок.

Рассмотрим организацию систем координат. На рис. 4 показан случай размещения излучающей структуры в плоскости YOX . Для решения задачи необходимо перейти от системы координат каждого элементарного излучающего треугольника (X^l, Y^l, Z^l) к глобальной системе координат антенны (X, Y, Z) . Для этого необходимо найти координаты центра элементарного треугольника. Воспользовавшись тригонометрическими преобразованиями можно получить следующее (см. рис. 5):

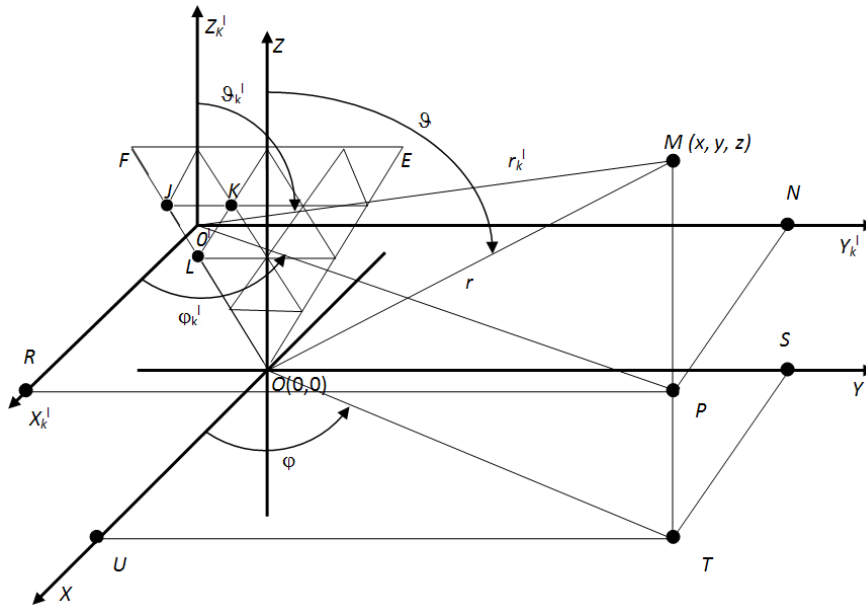


Рис. 4. Переход от сферической системы координат к декартовой

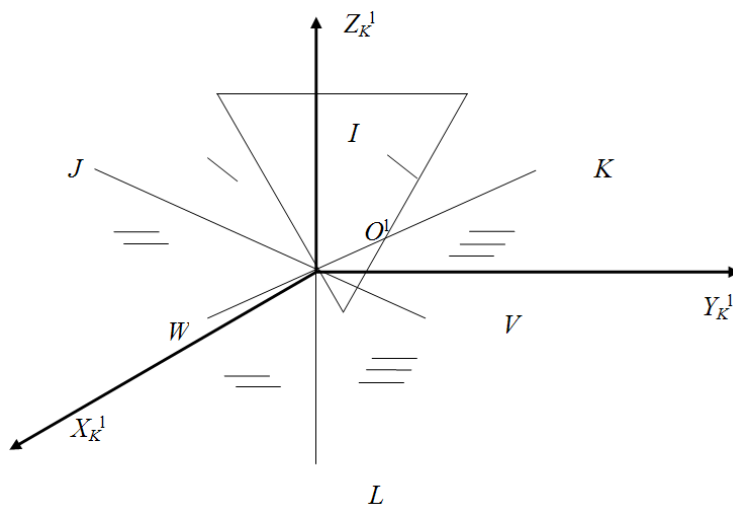


Рис. 5. Геометрия элементарного треугольника

Чтобы найти координаты точки O^1 необходимо из вершин треугольника провести медианы на противоположные ребра, точка пересечения медиан и будет центром треугольника — началом координат (X^1, Y^1, Z^1) .

Вычислим координаты точки O^1 , для этого определим координаты точки W , которая является

серединой отрезка JL и точки V — середины отрезка KL :

$$W\left(0, \frac{|Y_J| - |Y_L|}{2}, \frac{|Z_J| - |Z_L|}{2}\right), V\left(0, \frac{|Y_K| - |Y_L|}{2}, \frac{|Z_K| - |Z_L|}{2}\right).$$

Зная координаты точек W и V можно найти точку центра как пересечения двух прямых:

$$\frac{(Y_{O^1} - Y_J)}{\left(\frac{|Y_J| - |Y_L|}{2} - Y_J\right)} = \frac{Z_{O^1} - Z_J}{\frac{|Z_J| - |Z_L|}{2} - Z_J}, \quad \frac{(Y_{O^1} - Y_K)}{\left(\frac{|Y_K| - |Y_L|}{2} - Y_K\right)} = \frac{Z_{O^1} - Z_K}{\frac{|Z_K| - |Z_L|}{2} - Z_K}.$$

Эти уравнения определяют прямую проходящую через две точки. Из этих уравнений находим координаты Y_{O^1} и Z_{O^1} по следующим фор-

мулам:

$$Y_{O'} = \frac{\left(Y_J \cdot \frac{|Z_J| - |Z_L|}{2} - \frac{|Y_J| - |Y_L|}{2} \cdot Z_J \right) \cdot \left(\frac{|Y_K| - |Y_L|}{2} - Y_K \right)}{\left(\left(Z_J - \frac{|Z_J| - |Z_L|}{2} \right) \left(\frac{|Y_K| - |Y_L|}{2} - Y_K \right) - \left(Z_K - \frac{|Z_K| - |Z_L|}{2} \right) \left(\frac{|Y_J| - |Y_L|}{2} - Y_J \right) \right)} \cdot$$

$$\frac{\left(Y_K \cdot \frac{|Z_K| - |Z_L|}{2} - \frac{|Y_K| - |Y_L|}{2} \cdot Z_K \right) \left(\frac{|Y_J| - |Y_L|}{2} - Y_J \right)}{\left(\left(Z_J - \frac{|Z_J| - |Z_L|}{2} \right) \left(\frac{|Y_K| - |Y_L|}{2} - Y_K \right) - \left(Z_K - \frac{|Z_K| - |Z_L|}{2} \right) \left(\frac{|Y_J| - |Y_L|}{2} - Y_J \right) \right)} \cdot$$

$$Z_{O'} = \frac{\left(\left(Z_K - \frac{|Z_K| - |Z_L|}{2} \right) \cdot Y_{O'} - \left(Y_K \cdot \frac{|Z_K| - |Z_L|}{2} - \frac{|Y_K| - |Y_L|}{2} \cdot Z_K \right) \right)}{\left(\frac{|Y_K| - |Y_L|}{2} - Y_K \right)}$$

Далее следует найти значения (r, ϑ, φ) для системы координат связанной с элементарным треугольником JKL (см. рис. 4).

Найдем $r = O'M$: $O'M = \sqrt{MP^2 + O'P^2} = \sqrt{MP^2 + O'N^2 + NP^2}$,

$$\cos \vartheta_M = \frac{PM}{O'M} = \frac{Z_M - Z_{O'}}{\sqrt{(Z_M - Z_{O'})^2 + (Y_M - Y_{O'})^2 + (X_M - X_{O'})^2}},$$

$$\cos \varphi_M = \frac{NP}{O'M} = \frac{X_M - X_{O'}}{\sqrt{(Z_M - Z_{O'})^2 + (Y_M - Y_{O'})^2 + (X_M - X_{O'})^2}},$$

$$r = \sqrt{(Z_M - Z_{O'})^2 + (Y_M - Y_{O'})^2 + (X_M - X_{O'})^2}, \quad (5)$$

$$\vartheta_M = \arccos \left(\frac{Z_M - Z_{O'}}{\sqrt{(Z_M - Z_{O'})^2 + (Y_M - Y_{O'})^2 + (X_M - X_{O'})^2}} \right), \quad (6)$$

$$\varphi_M = \arccos \left(\frac{X_M - X_{O'}}{\sqrt{(Z_M - Z_{O'})^2 + (Y_M - Y_{O'})^2 + (X_M - X_{O'})^2}} \right). \quad (7)$$

Найдём напряженность электрических полей, которые действуют на произвольный треугольник κ .

$$E_{\Sigma \kappa} = \sum_{m=1}^n E_m - E_{\kappa},$$

где $E_{\Sigma \kappa}$ - суммарная напряженность электрических полей всех треуголь-

ников действующих на k , кроме поля излучаемого самим треугольником, $\sum_{m=1}^n E_m$ - суммарная напряженность электрических полей всех элементарных треугольников, E_k - напряженность электрического поля треугольника k .

Составим систему уравнений для каждого треугольника — элементарной площадки с учетом того, что собственное поле в точке размещения элементарной площадки не рассматривается:

$$\begin{cases} 0 + E_2 + \dots + E_n + E_{is} = E_{\Sigma k} \\ E_1 + 0 + \dots + E_n + E_{is} = E_{\Sigma k} \\ \dots \dots \dots \\ E_1 + E_2 + \dots + 0 + E_{is} = E_{\Sigma k} \end{cases} \quad (8)$$

где E_{is} — напряженность электрического поля создаваемого источником возбуждения.

Из условий геометрии, напряженность поля элементарного треугольника в точке наблюдения этого треугольника вдоль осей Y и X равно нулю:

$$E_{\Sigma n}^Y = 0, \quad E_{\Sigma n}^X = 0 \quad (9)$$

Запишем уравнение (4) с учетом условия геометрии (9):

$$E(r_k^l, \vartheta_k^l, \varphi_k^l) = I_{ctk}^l \cdot \frac{k^2 Z_{Bl}}{4\pi} \left\{ \begin{array}{l} 2 \left[\frac{1}{(kr_k^l)^2} - \frac{1}{i(kr_k^l)^3} \right] \cos \vartheta_k^l - \\ - \left[\frac{1}{ikr_k^l} + \frac{1}{(kr_k^l)^2} - \frac{1}{i(kr_k^l)^3} \right] \sin \vartheta_k^l \end{array} \right\} \cdot e^{-ikr_k^l} \cdot e_z, \quad (10)$$

и определим граничные условия для площадки k :

$$E_{\Sigma n}^z = 0 \quad (11)$$

Граничное условие (11) справедливо для любой элементарной площадки треугольника ABC .

Из системы уравнений (8) и граничного условия (11) запишем новую систему уравнений для Z компоненты:

$$\begin{cases} 0 + E_2 + \dots + E_n + E_{is} = 0 \\ E_1 + 0 + \dots + E_n + E_{is} = 0 \\ \dots \dots \dots \\ E_1 + E_2 + \dots + 0 + E_{is} = 0 \end{cases} \quad (12)$$

Подставляя в (12) упрощенное уравнение для напряженности поля (10) и решая данную систему, находим все сторонние токи на всех элементар-

ных площадках.

Выводы

Проанализировав вышеизложенное, сделаем следующий вывод. Используя данный метод можно определить напряженность электрического поля в дальней зоне излучения, зная токи на всех элементарных треугольных излучателях. На основе изложенного метода в настоящее время разрабатывается программа расчета диаграммы направленности модифицированной антенны Серпинского.

Литература

1. Исследование влияния геометрии возбуждающей щели на входные характеристики антенны: сб. науч. тр. научно-практической конф., 20-27 декабря 2011 г. / НИПКИ морфлота [и др.]; — Одесса.: Черноморье, 2011. — 94с. — ISSN 2224-0187
2. Ашихмин А.В. Анализ направленных свойств плоского биконического вибратора / А.В. Ашихмин, В.К. Маршаков, А.П. Преображенский // Вестник ВГУ Сер. Физика. Математика сб. науч. тр. – Воронеж, 2005, №1. — С. 13 — 19.
3. Семенов Н.А. Техническая электродинамика / М.: Связь, 1973. — 480 с.

Нудьга А.А. Електродинаміка багатодіапазонної антени. В роботі представлено метод визначення діаграми спрямованості багатодіапазонної антени, котра оснований на фрактальній антені Серпинського. Метод оснований на умовному розбитті випромінюючої структури на елементарні випромінювачі та в подальшому на відшукуванні струмів в кожній елементарній трикутній площадці. Наступним кроком є відшукування складової напруженості електричного поля площадки, і в подальшому в підсумовуванні складових електричного поля від усіх трикутників в точці спостереження.

Ключевые слова: багатодіапазонна антена, діаграма спрямованості, напруженість електричного поля.

Нудьга А.А. Електродинаміка багатодіапазонної антени. В роботі представлений метод визначення діаграми спрямованості багатодіапазонної антени, котра оснований на фрактальній антені Серпинського. Метод оснований на умовному розбитті випромінюючої структури на елементарні випромінювачі та в подальшому на відшукуванні струмів в кожній елементарній трикутній площадці. Наступним кроком є відшукування складової напруженості електричного поля площадки, і в подальшому в підсумовуванні складових електричного поля від усіх трикутників в точці спостереження.

Ключові слова: багатодіапазонна антена, діаграма спрямованості, напруженість електричного поля

Nudga A.A. Electrodynamics multi-band antennas. This paper presents a method for determining the multiband antenna radiation pattern, which is based on the fractal Serpinski antenna. The method is based on a conditional subdivision radiating structures at elementary radiators. Next to find the currents in each elementary site of triangular. The next step is to find a component of the area of electric field. At the end, a summation of the components of the electric field of all the triangles in a point observation.

Keywords: multi-band antennas, radiation pattern, the electric field.