

## РАСSEИВАЮЩИЕ СВОЙСТВА РЕЗОНАНСНЫХ РАМОЧНЫХ ЩЕЛЕВЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ДЛЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ МИКРОПОЛОСКОВОЙ АНТЕННЫ

А. Е. Свеженцев, В. В. Крыжановский

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины*  
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина  
E-mail: [svezh@ire.kharkov.ua](mailto:svezh@ire.kharkov.ua); [vl\\_kryzhan@list.ru](mailto:vl_kryzhan@list.ru)

Расчитано радиолокационное сечение рассеяния цилиндрической микрополосковой антенны с новыми рамочными полосковыми излучателями со щелью. Изучены резонансные свойства одиночного и связанных рамочных полосковых излучателей со щелью. Рассчитаны амплитудные и фазовые распределения плотности поверхностного тока на излучателях. Показано, что резонансные частоты предложенных рамочных полосковых излучателей со щелью сильно сдвигаются в низкочастотную область по сравнению с характерными частотами излучателей прямоугольно-цилиндрической формы. Показана перспективность применения данных излучателей в малогабаритных микрополосковых антеннах, в том числе в более коротковолновых диапазонах. Ил. 5. Библиогр.: 9 назв.

**Ключевые слова:** радиолокационное сечение рассеяния, рамочные полосковые излучатели со щелью, метод моментов.

В настоящее время цилиндрические микрополосковые антенны (ЦМА) находят широкое применение в системах мобильной и спутниковой радиосвязи, используются для связи между воздушными и морскими объектами. К одному из распространенных методов анализа таких антенн в случае малого волнового размера ( $r_1 < \lambda_0$ , где  $r_1$  – радиус металлического цилиндра,  $\lambda_0$  – длина волны в свободном пространстве) относится метод моментов, который может быть применен как в спектральной [1–5], так и в пространственной областях [6, 7]. Использование в схеме метода моментов кусочно-заданных базисных функций, как это было сделано в работах [2–5, 7], позволяет проводить анализ излучателей сложной формы. Однако немногочисленные конкретные результаты по излучателям сложной формы приведены лишь в статьях [3–5]. В частности, в работе [3] для согласования антенны на основе прямоугольно-цилиндрического излучателя и питающей микрополосковой линии был использован согласующий переход в виде отрезка компланарной линии. В статье [4] было рассчитано входное сопротивление ЦМА с излучателем *E*-формы при возбуждении коаксиалом. Результаты расчета радиолокационного сечения рассеяния (РСР) для ЦМА с прямоугольно-цилиндрическим излучателем, имеющим узкие щели различной геометрии, приведены в статье [5].

В данной статье рассматриваются новые типы излучателей для ЦМА, а именно, одиночный и связанные рамочные полосковые излучатели со щелью. Такие излучатели, в отличие от излучателей, рассмотренных в статье [5], работают на основе эффекта щелевого резонанса [8]. В статье приводятся результаты расчета РСР для ЦМА с излучателями нового типа, а также анализируется распределение плотности тока на излучате-

лях на резонансной частоте. Анализ ЦМА проводится методом моментов в спектральной области, используя кусочно-заданные синусоидальные базисные функции [4, 5].

**1. Теория.** Рассмотрим модель ЦМА (рис. 1, а), которая состоит из металлического рамочного полоскового излучателя со щелью, расположенного на поверхности так называемой линии Губо [9].

Линия Губо представляет собой бесконечный в направлении  $z$  круговой металлический цилиндр, окруженный слоем диэлектрика, который в нашем случае служит подложкой. Радиусы диэлектрической подложки и металлического цилиндра  $r_0$  и  $r_1$  соответственно, относительная диэлектрическая проницаемость подложки  $\epsilon_r$ . Геометрия одиночного и связанных рамочных полосковых излучателей со щелью приведена на рис. 1, б, в соответственно. Пусть плоская волна падает нормально к поверхности излучателя, а именно, вдоль направления  $-x$ . Решение задачи о рассеянии плоской волны на ЦМА с помощью метода моментов в спектральной области приведено в статье [5]. Используя это решение, мы находим распределение тока на излучателе и, следовательно, можем определить поле в любой точке пространства, в том числе и поле в дальней зоне в виде  $\vec{E}^{scat,J}(R, \theta, \varphi)$ . Тогда РСР вычисляется по формуле

$$\sigma_{uv} = \frac{4\pi \left| \vec{E}^{scat,J}(R, \theta = \pi/2, \varphi = 0) \vec{i}_v \right|^2}{\left| \vec{E}_u^0 \right|^2} \quad (1)$$

$$(u, v = \theta, \varphi),$$

где  $\left| \vec{E}_u^0 \right|$  – амплитуда поля падающей плоской волны, поляризованной в  $u$ -направлении;  $\vec{i}_v$  –

единичный вектор вдоль  $\nu$ -направления;  $\vec{E}^{scat}, \vec{J}_\nu^-$  означает  $\nu$ -компоненту поля, вычисленную в направлении  $\theta = \pi/2, \varphi = 0$ .

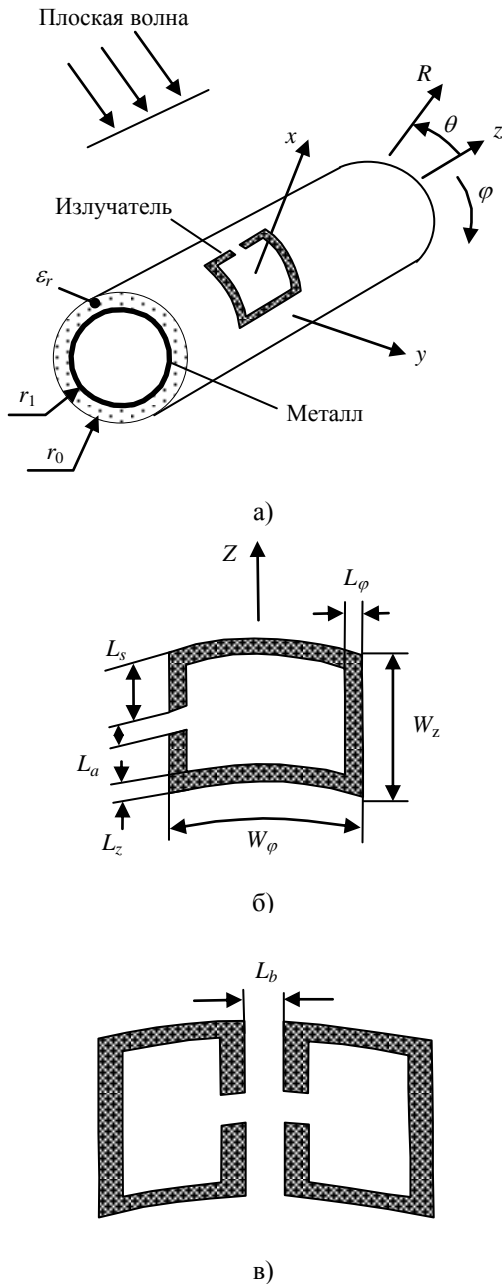


Рис. 1. ЦМА с излучателями сложной формы: а) – возбуждение плоской волной ЦМА с рамочным полосковым излучателем со щелью; б) – подробная геометрия одиночного рамочного излучателя со щелью; в) – связанные рамочные излучатели со щелями

**2. Результаты.** Пусть параметры линии Губо таковы, что  $r_1 = 0,025$  м,  $\epsilon_r = 2,2$ ,  $r_0/r_1 = 1,0316$ . Рамочный излучатель со щелью имеет следующие геометрические размеры:  $W_z = 4,032$  см,  $W_\varphi = 1,92$  см,  $L_\varphi = 0,12$  см,  $L_s =$

$= 1,512$  см,  $L_a = 1,008$  см,  $L_z = 0,504$  см. Излучатель разбит сеткой  $8 \times 16$  на 128 ячеек, т. е. размеры сетки составляют 8 и 16 ячеек вдоль  $z$ - и  $\varphi$ -направлений соответственно. Для связанных рамочных излучателей со щелью:  $W_z = 4,032$  см,  $W_\varphi = 1,032$  см,  $L_\varphi = 0,129$  см,  $L_s = 1,512$  см,  $L_a = 1,008$  см,  $L_z = 0,504$  см,  $L_b = 0,387$  см. Связанные излучатели разбиты сеткой на 8 и 19 ячеек вдоль тех же направлений. Геометрические размеры одной ячейки для одиночного и связанных излучателей вдоль  $z$ - и  $\varphi$ -направлений составляют  $L_z$  и  $L_\varphi$  соответственно.

На рис. 2 приведены рассчитанные зависимости величины  $\sigma_{\theta\theta}/\sigma_0$  (где  $\sigma_0 = \pi W_z W_\varphi$  – нормирующий множитель) от частоты для рамочного излучателя со щелью (кривая 1), для двух связанных рамочных излучателей со щелями (кривая 2), а также для излучателя прямоугольно-цилиндрической формы (кривая 3). Отметим, что размер одиночного рамочного излучателя в  $\varphi$ -направлении в два раза больше аналогичного размера для каждого из связанных излучателей. Поэтому резонансная частота для одиночного рамочного излучателя со щелью заметно меньше, чем двух связанных рамочных излучателей. Распределение амплитуд и фаз  $z$ - и  $\varphi$ -компонент плотности тока для связанных рамочных излучателей со щелью показано на рис. 3 и рис. 4 соответственно. Разность фаз между черным и белым цветом на рис. 4 составляет  $180^\circ$ .

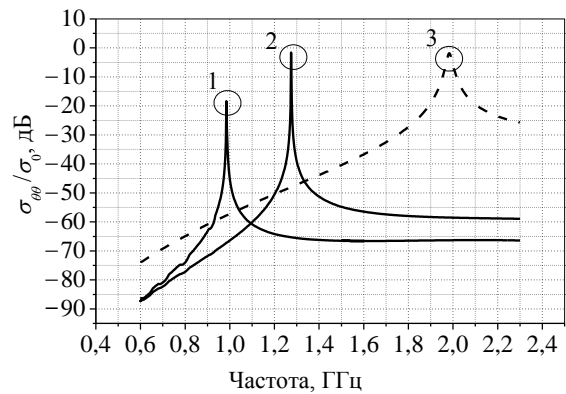


Рис. 2. Радиолокационное сечение рассеяния  $\sigma_{\theta\theta}/\sigma_0$  и резонансные частоты  $f$  для ЦМА с излучателями различной формы: 1 – с рамочным излучателем со щелью,  $f_1 = 0,985$  ГГц; 2 – со связанными рамочными излучателями со щелями,  $f_2 = 1,275$  ГГц; 3 – с излучателем прямоугольно-цилиндрической формы,  $f_3 = 1,9825$  ГГц

Видно, что  $z$ -компонента тока в каждом из связанных излучателей преимущественно распределена на полосковом проводнике, имеющем размер  $W_z$  и расположенном напротив щели. При этом сдвиг фаз между током на указанных противоположных сторонах одиночного излучателя

составляет  $180^\circ$ . Также видно, что модуль  $\varphi$ -компоненты тока в одиночном излучателе одинаково распределен на двух полосковых проводниках, расположенных в  $\varphi$ -направлении, однако сдвиг фаз для тока на этих проводниках составляет  $180^\circ$ . Анализ распределения тока для связанных излучателей показал, что для  $z$ -компоненты тока амплитудное и фазовое распределения являются симметричными относительно плоскости  $\varphi = 0^\circ$ . В то же время для  $\varphi$ -компоненты тока амплитудное распределение плотности тока является симметричным, а фазовое распределение является антисимметричным относительно плоскости  $\varphi = 0^\circ$ . Отметим, что найденные особенности фазового распределения плотности тока в связанных излучателях при симметричном возбуждении дают основание утверждать, что вклад  $\varphi$ -компоненты тока в диаграмму направленности будет минимальным.

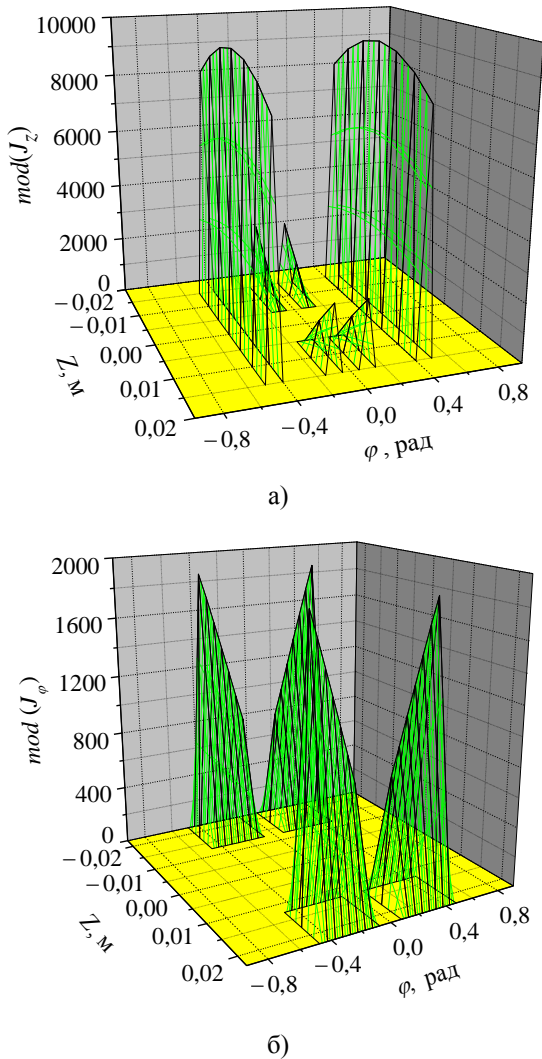


Рис. 3. Распределения токов на двух связанных рамочных излучателях со щелями: а)  $|J_z(z, \varphi)|$ ; б)  $|J_\varphi(z, \varphi)|$

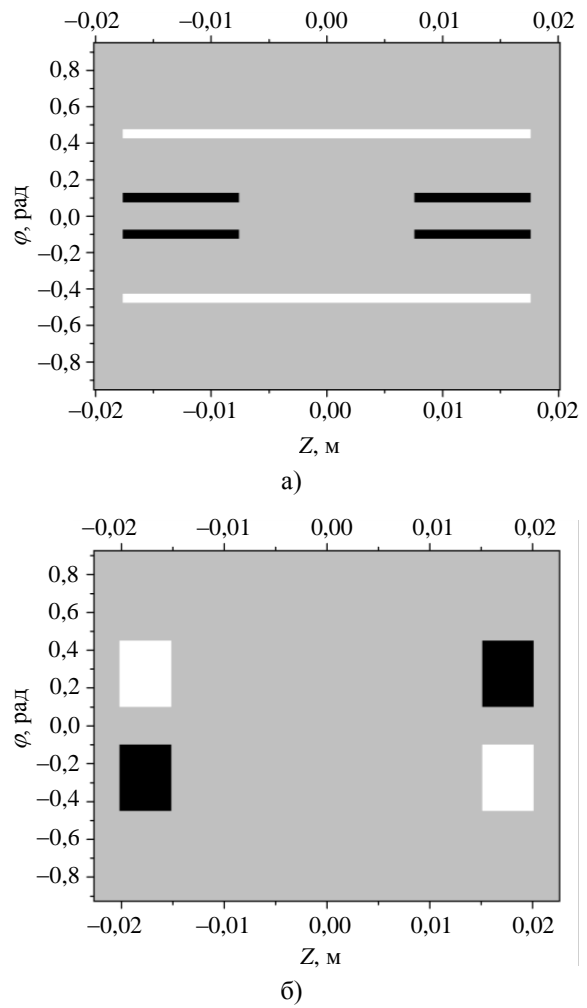


Рис. 4. Распределение фаз компонент плотности поверхностного тока на двух связанных рамочных излучателях со щелями: а)  $J_z(z, \varphi)$ ; б)  $J_\varphi(z, \varphi)$

Для подтверждения полученных в статье результатов по связанным излучателям проведем дополнительные исследования и сравнение со случаем, когда геометрия излучателей является плоской. Рассмотрим случай, когда связанные излучатели (см. рис. 1, в) расположены на плоской диэлектрической подложке, лежащей на металлической плоскости. Эти излучатели возбуждаются микрополосковой линией, как это показано на рис. 5, а.

Пусть плоская микрополосковая антенна имеет такие же материальные и геометрические параметры, как и ее цилиндрический аналог, рассмотренный выше. Имеющиеся в наличии параметры следует дополнить значениями:  $W_{str} = L_u = L_\varphi = 0,129$  см. Для анализа плоской микрополосковой антенны была использована программа *Sonnet* 12.53. На рис. 5, б приведена рассчитанная зависимость модуля коэффициента отражения от частоты. Видно, что на резонансной частоте, равной  $f = 1,2737$  ГГц, коэффициент от-

ражения достигает минимального значения  $\text{mod}(S_{11}) = -6,48$  дБ. Сравнение резонансных частот связанных рамочных полосковых излучателей со щелью для цилиндрического (рис. 2) и плоского (рис. 5, б) случаев показывает, что разница не превышает 0,12 %, что говорит об очень хорошем совпадении результатов. Анализ распределения плотности тока на резонансной частоте для плоского излучателя показал, что мы имеем дело с тем же самым эффектом щелевого резонанса, что и в цилиндрическом случае. Исследования показали, что резонансная частота уменьшается с уменьшением размера щели.

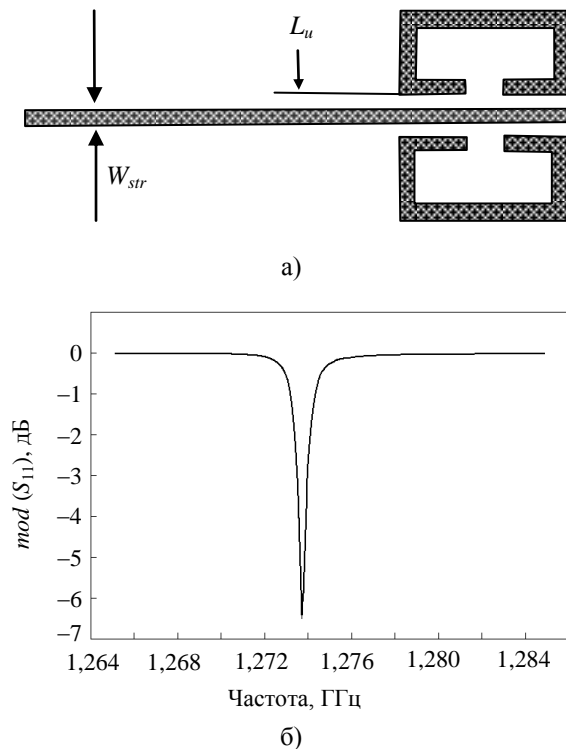


Рис. 5. Характеристики плоских рамочных излучателей со щелью, возбуждаемых микрополосковой линией: а) – геометрия антенны; б) – зависимость величины модуля коэффициента отражения от частоты

**Выводы.** Приведены результаты расчета РСР ЦМА с одиночным и связанными рамочными полосковыми излучателями со щелью, а также для сравнения приведен результат для прямоугольно-цилиндрического излучателя тех же размеров, что и рамочные излучатели. Показано, что для рамочных полосковых излучателей со щелью резонансная частота лежит в значительно более низкочастотной области, чем для прямоугольно-цилиндрического излучателя. Это объясняется тем, что резонансные явления в предложенных рамочных излучателях происходят на основе эффекта щелевого резонанса. Добротность резонансных колебаний в таких излучателях значи-

тельно превышает добротность резонансного колебания для прямоугольно-цилиндрического излучателя. Приведено сравнение резонансных частот для цилиндрической и плоской микрополосковых антенн со связанными рамочными полосковыми излучателями со щелью и показано, что отличие составляет менее 0,12 %. Отметим, что анализ в двух случаях проводился различными методами. Очевидно, что предложенные рамочные полосковые излучатели со щелью являются перспективными для микрополосковых антенн. Преимуществом является отсутствие электрического контакта при запитке таких излучателей с помощью микрополосковой линии, так как это дает возможность в очень широких пределах регулировать связь излучателя с линией за счет изменения расстояния между ними при фиксированных геометрических размерах составляющих элементов. Данная особенность может быть востребованной при проектировании антенн в сантиметровом и, возможно, в миллиметровом диапазонах волн, так как антенны с последовательной запиткой большого количества излучателей требуют реализации достаточно слабой связи.

1. *Habashy T. M.* Input impedance and radiation pattern of cylindrical-rectangular and wraparound microstrip antennas / T. M. Habashy, S. M. Ali, J. A. Kong // *IEEE Trans. Antennas and Propagation.* – 1990. – 38, N 6. – P. 722–731.
2. *Vecchi G.* Analysis of cylindrical printed antennas with subsectional basis functions in the spectral domain / G. Vecchi, T. Bertuch, M. Orefice // *Proc. of the International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA96).* – Torino, 1996. – P. 301–304.
3. *Bertuch T.* Efficient spectral-domain simulation of conformal antennas of arbitrary shapes printed on circular cylinders / T. Bertuch, G. Vecchi, M. Orefice // *Proc. of the Millennium Conference on Antennas & Propagation.* – Davos, 2000 (CD-ROM).
4. *Свеженцев А. Е.* Входное сопротивление цилиндрической микрополосковой антенны с излучателем произвольной формы при возбуждении коаксиалом / А. Е. Свеженцев // *Радиофизика и электроника: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины.* – Х., 2009. – 14, № 3. – С. 286–294.
5. *Svezhentsev A. Ye.* Patch shape influence upon radar cross section of a cylindrical microstrip antenna / A. Ye. Svezhentsev, V. V. Kryzhanovskiy // *Progress in Electromagnetic Research (PIERB).* – 2009. – N 15. – P. 307–324.
6. *Analysis of microstrip antennas on circular-cylindrical substrates with a dielectric overlay / F. C. Silva, S. B. A. Fonseca, A. J. M. Soares, A. J. Giarola // IEEE Trans. Antennas and Propagation.* – 1991. – 39, N 9. – P.1398–1404.
7. *Svezhentsev A. Ye.* Efficient spatial domain moment method solution of cylindrically rectangular microstrip antennas / A. Ye. Svezhentsev, G. A. E. Vandenbosch // *IEE Proceedings, Microwaves, Antennas and Propagation.* – 2006. – 153, Issue 4. – P. 376–384.
8. *Superdirective antenna array of printed parasitic elements / S. A. Bokhari, H. K. Smith, J. R. Mosig et al. // Electronic letters.* – 1992. – 28, N 14. – P. 1332–1334.
9. *Goubau G.* Surface waves and their applications transmission lines / G. Goubau // *J. Appl. Phys.* – 1950. – 21, N 11. – P. 1119–1128.

SCATTERING PROPERTIES OF RESONANT  
SLOT-FRAMED PATCHES FOR CYLINDRICAL  
MICROSTRIP ANTENNA

A. Ye. Svezhentsev, V. V. Kryzhanovskiy

A radar cross-section of cylindrical microstrip antenna with new slotted strip-framed patches has been calculated. A resonant behavior versus frequency for slotted strip framed patches has been studied. The amplitude and the phase current density distributions on the patch surface have been calculated. It has been found that the resonant frequencies of slotted strip-framed patches can be at substantially lower frequencies as compared to the rectangular cylindrical patch case. The potential of the discussed patches has been shown for the application to small-size cylindrical microstrip antennas including the short-wave employment.

**Key words:** radar cross-section, slotted strip-framed patches, cylindrical microstrip antenna, the moment method.

РОЗСІЮВАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ  
РЕЗОНАНСНИХ РАМКОВИХ ЩІЛИННИХ  
ВИПРОМІНЮВАЧІВ ДЛЯ ЦИЛІНДРИЧНОЇ  
МІКРОСМУЖКОВОЇ АНТЕНИ

О. Є. Свеженцев, В. В. Крижановський

Виконано розрахунки радіолокаційного перетину розсіяння циліндричної мікросмужкової антени з новими рамковими смужковими випромінювачами зі щілиною. Вивчено резонансні властивості окремого і зв'язаних рамкових смужкових випромінювачів зі щілиною. Виконано розрахунки амплітудного й фазового розподілів щільності поверхневого току на випромінювачах. Показано, що резонансні частоти запропонованих рамкових смужкових випромінювачів зі щілиною дуже зсунуті в низькочастотну область порівняно з характерними частотами випромінювачів прямокутно-циліндричної форми. Доведено перспективність застосування даних випромінювачів у малогабаритних мікросмужкових антенах, у тому числі в більш короткохвильових діапазонах.

**Ключові слова:** радіолокаційний перетин розсіяння, рамкові смужкові випромінювачі зі щілиною, метод моментів.

*Рукопись поступила 15 февраля 2010 г.*