

УДК 621.396.67

ВОГНУТЫЕ ПОЛУПРОЗРАЧНЫЕ ЭКРАНЫ ДЛЯ ОТСЕЧКИ ПОЛЯ В ЗОНЕ ТЕНИ**Д. В. Татарников^{1,2}, А. А. Генералов^{1,2,3}**¹Топкон Позиционинг Системс, 115114 Москва, Дербеневская наб., 7с22²Московский Авиационный Институт, 125993 Москва, Волоколамское шоссе, 4³Институт Проблем Управления РАН, 117997 Москва, Профсоюзная ул., 65

Статья поступила в редакцию 22 января 2018 г.

Аннотация. Рассматриваются вогнутые полупрозрачные экраны, обеспечивающие резкий перепад (отсечку) ДН источника излучения при пересечении границы зоны тени. Задача представляет интерес для проблем подавления задних лепестков антенн, включая антенные решетки. Имеет отношение к проблемам улучшения электромагнитной совместимости, уменьшения ошибки многолучевости. Рассмотрение ведется в сравнении с задачей формирования отсечки ДН в случае с плоским полупрозрачным транспарантом. Развита методика синтеза импеданса в приближении геометрической оптики; распределение импеданса при этом получается чисто резистивным. Проведена численная оценка границ применимости предлагаемого подхода. За пределами применимости приближения геометрической оптики разработана оптимизационная процедура синтеза; импеданс оказывается комплексным с неотрицательной действительной частью. Обсуждаются численные оценки, в том числе влияние частотной зависимости импеданса на реализуемую величину отсечки. Показано, что основным ограничивающим фактором в реализации ДН с отсечкой является размер экрана.

Ключевые слова: дифракция на экране, полупрозрачный слой, подавление поля, зона тени, ДН с отсечкой.

Abstract. Concaved semi-transparent screen forming a sharp drop (cut-off) of the source radiation pattern when crossing the border shadow area is discussed.

The problem is of interest for problems of the antennas back lobes suppression, including antenna arrays. It is connected with the improving of the electromagnetic compatibility and the reduction of the multipath errors. The review is made in comparison with the problem of forming a cut-off pattern in the case of a flat semi-transparent screen. Approach for the synthesis of impedance in the geometrical optics approximation is developed; the distribution of the impedance becomes purely resistive. Numerical evaluation of the limits of applicability of the proposed approach is carried out. Beyond the applicability of the approximation of geometrical optics, the synthesis optimization procedure is developed; the impedance becomes complex with nonnegative real part. Numerical estimates, including the impact of the frequency dependence of the impedance distribution on the cutoff value are discussed. It is shown that the main constraint factor for achieving the cut-off pattern is the screen size.

Key words: diffraction by the semi-transparent screen, shadow domain, cut-off pattern.

1. Введение

Работа посвящена проблематике уменьшения излучения источника в нерабочую область углов. Эта область далее называется зоной тени. Излучение в зону тени в ряде случаев определяет электромагнитную совместимость, помехозащищенность или предельную точность систем. Для систем позиционирования КУ антенны в направлении ниже местного горизонта определяет [1,2] ошибку многолучевости. В отмеченных случаях желателен возможно более резкий перепад ДН источника при переходе из рабочей области к зоне тени; далее такой перепад называется отсечкой.

Первоначальные результаты в этом направлении обсуждались в [3]. Здесь показано, что с помощью плоского полупрозрачного транспаранта крутизну спада поля в теневой зоне можно существенно увеличить. Ранее возможности уменьшения уровня задних лепестков ДН в зеркальных антеннах

рассматривались в [4-6]. Получение ДН с резкой отсечкой в этих последних не рассматривалось.

Данная работа является продолжением [3,7]. В отличие от [3,7], рассматриваемый ниже экран представляет собой вогнутую цилиндрическую поверхность, охватывающую источник излучения. Таким образом, рассматривается модельная система в двумерном приближении (рис.1), состоящая из источника излучения 1, расположенного в центре экрана 2. Здесь I – зона открытого пространства, II – зона тени. Идеально проводящая часть экрана, изображенная сплошной линией, ближе к краям экрана переходит в полупрозрачную, схематично показанную пунктиром. Предполагается, что полупрозрачные края возвышаются над границей свет-тень (ось x) вплоть до уровня $\theta^e \approx 10^\circ$. Полупрозрачность понимается в смысле выполнения граничных условий для электрически тонкого слоя [8]. Параметром, характеризующим слой, является импеданс $Z_g(\theta)$. Импеданс предполагается комплексным и переменным как функция угловой координаты θ . Физической реализацией такого импеданса в диапазоне СВЧ являются сетки [8-9] с включенными комплексными нагрузками аналогично [10].

Задача состоит в синтезе импеданса экрана $Z_g(\theta)$, формирующего резкий перепад (отсечку) ДН при переходе из зоны I в зону II (рис.1). Следуя способу [3,7], для $b \gg \lambda$ (где λ – длина волны) задача допускает аналитическое решение в геометрикооптическом приближении, при этом импеданс $Z_g(\theta)$ оказывается чисто резистивным (раздел 2). По мере уменьшения характерного размера экрана (радиуса b) геометрикооптическое приближение как таковое становится непригодным; синтезируемый импеданс не обеспечивает отсечки поля. Однако этот импеданс является хорошим первым приближением для численной оптимизационной процедуры; импеданс $Z_g(\theta)$ приобретает комплексный характер с положительной действительной частью (раздел 3). Работа завершается примером применения экрана для подавления заднего излучения антенной решетки (раздел 4).

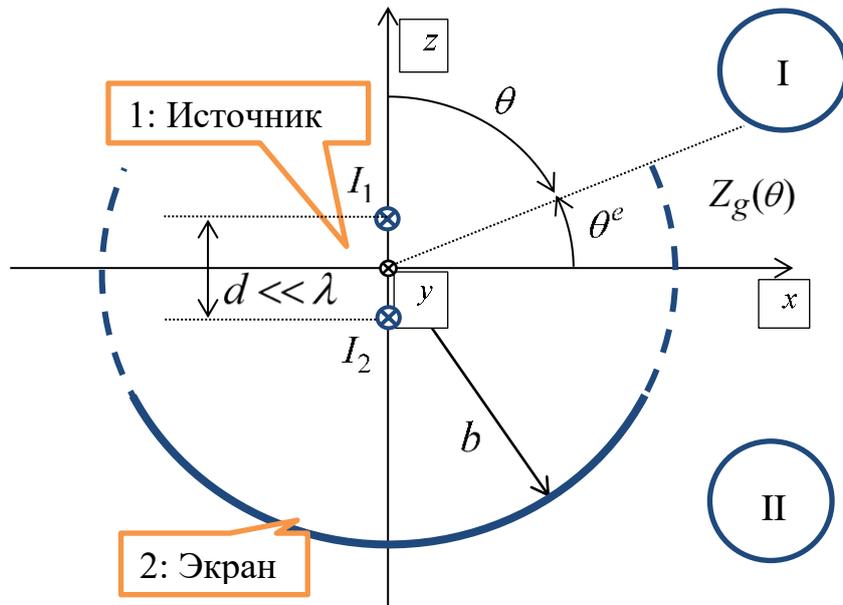


Рис. 1. Геометрия задачи.

2. Приближение геометрической оптики

Рассматривается двумерная задача дифракции, представленная на рис.1. Источником излучения выступают две нити тока, расположенные на оси z , d – расстояние между нитями, $I_{1,2}$ – амплитуды тока. Для $\{H;-E\}$ поляризации ток источника выбирался $\{\text{магнитным}; \text{электрическим}\}$ соответственно. Для $d \ll \lambda$ и $I_2 = -I_1 e^{-ikd} = -I e^{-ikd/2}$ источник формирует кардиоидную ДН $F(\theta) = (1 + \cos(\theta)) / 2$, где $k = 2\pi / \lambda$ – волновое число.

Пусть желаемая ДН имеет вид гладкой трансформации ДН источника:

$$F^\Sigma(\theta) = \gamma(\theta) F(\theta) \quad (1)$$

где $F(\theta)$ – ДН источника, $F^\Sigma(\theta)$ – желаемая ДН, $\gamma(\theta) \in [0,1]$ – коэффициент трансформации. Этот коэффициент равен 1 в области невозмущенного поля источника и обращается в 0 в зоне тени. В отличие от [3,7], в приближении геометрической оптики лучи ориентированы по нормали к поверхности экрана и выражение для распределения импеданса по экрану записывается в виде:

$$Z_g(\theta) = R_g(\theta) = W_0 \frac{\gamma(\theta)}{2(1-\gamma(\theta))} > 0 \quad (2)$$

Справедливость (2) проверялась численно путем решения точного интегрального уравнения для тока экрана:

$$\int G j^e dz + E_\tau = Z_g(\theta) j^e \quad (3)$$

Здесь G – функция Грина, E_τ – поле излучения источника, j^e – эквивалентный электрический ток экрана.

При помощи MATLAB была реализована численная процедура решения интегрального уравнения методом моментов, функция Грина представлялась в виде разложения по цилиндрическим гармоникам, для представления тока экрана выбрана кусочно-линейная аппроксимация аналогично [10].

ДН $F^1(\theta)$, реализующиеся с применением распределения (2) для различных размеров b экрана для двух типов поляризации представлены на рис.2. Желаемая ДН $F^2(\theta)$ показана пунктиром. Как видно, для размеров $b \geq 30\lambda$ удаётся получить ДН с отсечкой более 40дБ в секторе углов $\pm 10^\circ$ относительно границы свет-тень. Однако, применимость (2) ухудшается с уменьшением размера b . Это хорошо согласуется с результатами, полученными ранее в [3,7] для плоского транспаранта.

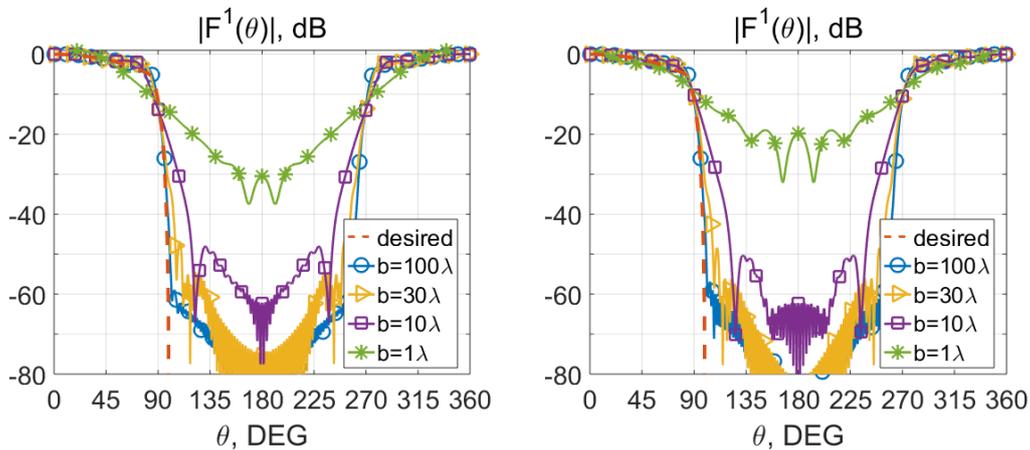


Рис.2 Результирующие ДН. Слева – E-поляризация. справа - H-поляризация.

3. Оптимизационная процедура синтеза

Для оценки возможности сохранения резкой отсечки с уменьшением размеров экрана была разработана численная оптимизационная процедура

синтеза импеданса. Процедура основана на минимизации нормы $\|F^1 - F^d\|$ варьированием импеданса $Z_g(\theta)$. На каждом шаге для некоторого $Z_g(\theta)$ искалось решение интегрального уравнения (3) для определения F^1 . Импеданс предполагался комплексным с неотрицательной действительной частью. В качестве начального приближения использовалось выражение (2).

Результаты синтеза представлены на рис.3,4. Слева приведены отношения «низ-верх» $DU(\theta^e) = |F(-\theta^e) / F(\theta^e)|$ при различных размерах экрана b для случаев E - и H - поляризации соответственно. Справа приведены действительные и мнимые составляющие распределения импеданса в секторе углов $\theta = 80^\circ..180^\circ$. Для углов $\theta = 180^\circ..280^\circ$ распределение симметрично.

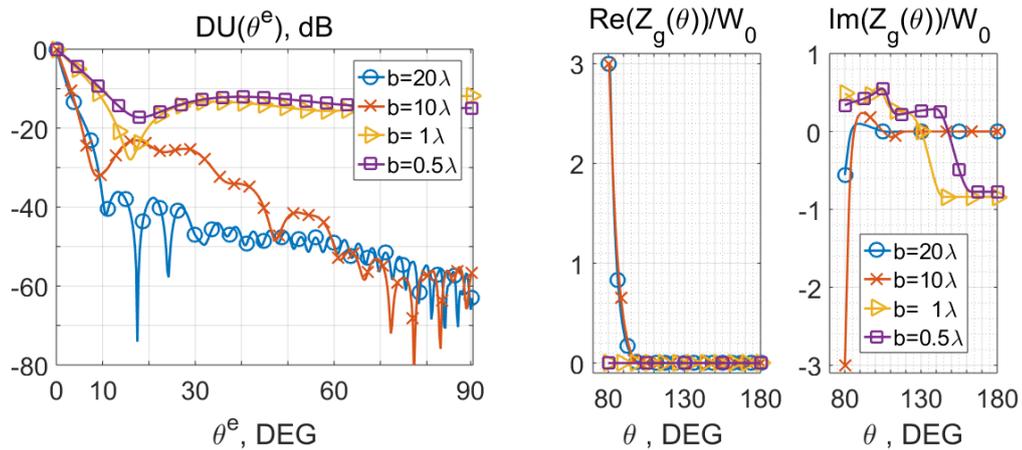


Рис.3. Результаты синтеза. E-поляризация. Слева - $DU(\theta^e)$, справа - $Z_g(\theta)$.

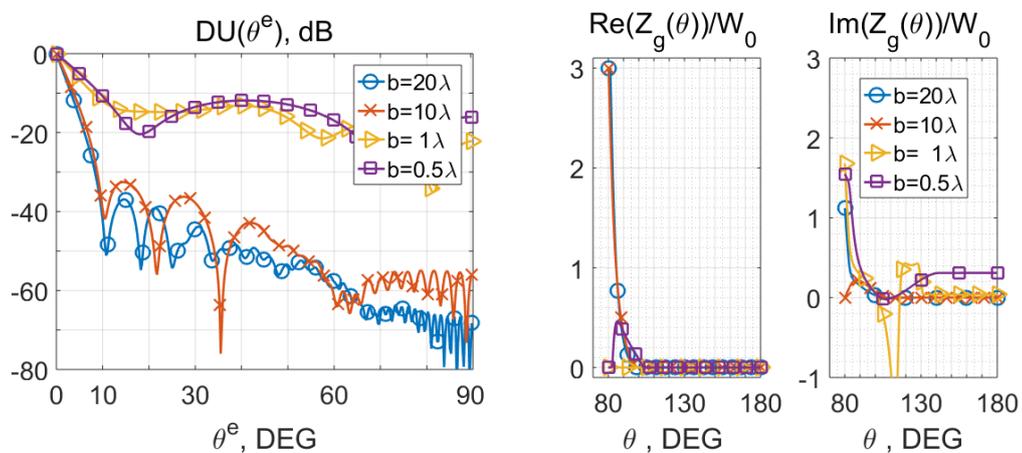


Рис. 4. Результаты синтеза. H-поляризация. Слева - $DU(\theta^e)$, справа - $Z_g(\theta)$.

Таблица 1. Результаты синтеза

$\frac{b}{\lambda}$	Случай Н-поляризации, $DU(10^\circ)$, дБ			Случай Е-поляризации, $DU(10^\circ)$, дБ		
	$f_0 \pm 15\%$	$f_0 \pm 3\%$	f_0	$f_0 \pm 15\%$	$f_0 \pm 3\%$	f_0
100	-	-	-41	-	-	-42
50	-	-	-40	-	-	-40
20	-	-	-42(-37)	-	-	-38(-36)
10	-	-	-39(-33)	-	-	-33(-24)
5	-14	-21	-30(-26)	-14	-17	-30(-25)
2	-5	-14	-20(-15)	-11	-14	-21(-16)
1	-3	-9	-12(-13)	-8	-10	-13(-12)
0,5	-3	-9	-11(-12)	-6	-6	-10(-12)

Из результатов следует, что при $b/\lambda = 1$ реализуемая величина отсечки достигает порядка $DU(10^\circ) \sim -10\text{dB}$. Начиная с размеров $b/\lambda = 10$ и больше, достигается отсечка порядка $DU(10^\circ) \sim -30\text{dB}$ и лучше. Распределения импеданса при этом ведут себя достаточно гладко как функция угловой координаты. Дополнительно исследовались частотные свойства экрана в полосе частот $\pm 3\%$ и $\pm 15\%$. Полученные результаты сведены в Таблицу 1. Приведенные величины соответствуют значению отношения «низ-верх» под низким углом к горизонту: $DU(10^\circ)$. В скобках приведены значения, соответствующие максимумам отношения «низ-верх» в зоне тени $\max_{\theta^e > 10^\circ} (DU(\theta^e))$. Таким образом, основным ограничивающим фактором для реализации отсечки является размер экрана. Размер экрана также определяет возможность сохранения величины отсечки в полосе частот.

4. Подавление заднего поля антенной решетки

В качестве примера практического применения проведена оценка свойств вогнутого экрана для подавления заднего поля излучения антенной решетки. В

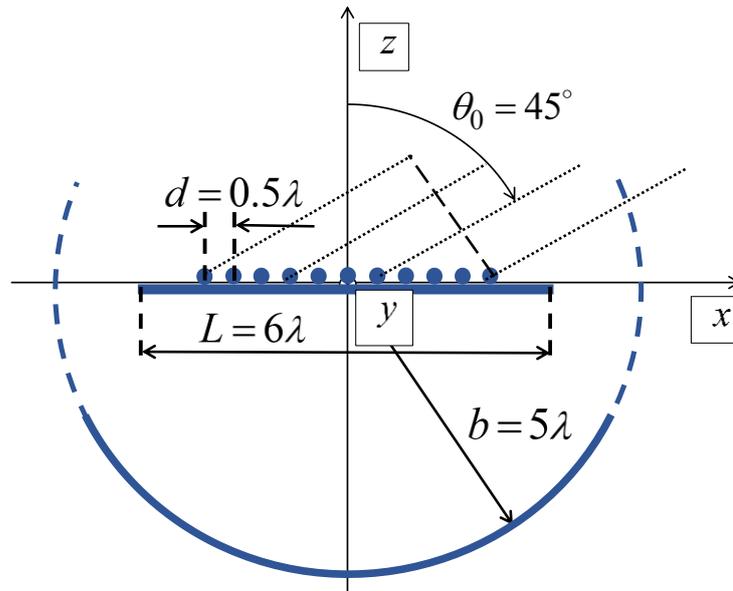


Рис. 5. Экран антенной решетки.

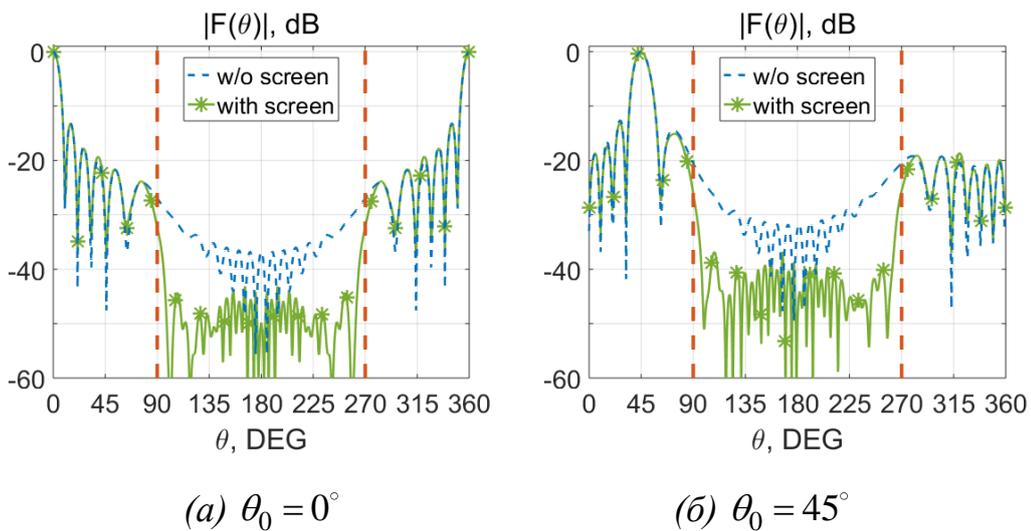


Рис. 6. Подавление заднего поля антенной решетки.

качестве источника использовалась двумерная модель излучения плоской антенной решетки, состоящая из 11 нитей магнитного тока, отстоящих друг от друга на 0.5 длины волны и расположенных на конечном металлическом экране протяженностью 6 длин волн (рис. 5). Распределение амплитуд возбуждения было выбрано с целью формирования главного луча в направлении θ_0 . ДН такой решетки на экране конечных размеров оценивалась в приближении физической оптики аналогично [1]. Эта ДН приведена на рис.6(а),(б) пунктиром. Уровень заднего поля этой ДН достигает значений порядка -35дБ;-

30дБ для $\theta_0 = 0^\circ; 45^\circ$ соответственно. При помощи полупрозрачного экрана с размером $b = 5$ длин волн излучение в зоне глубокой тени снижено до значений порядка -45дБ в случае $\theta_0 = 0^\circ$ и порядка -40дБ в случае $\theta_0 = 45^\circ$; под углом 10° ниже плоскости экрана достигнута отсечка поля на 18дБ; 15дБ лучше исходной, соответственно (рис.6).

5. Заключение

Рассмотрены вогнутые полупрозрачные экраны для отсечки поля в зоне тени. Показано, что при введении полупрозрачного края экрана возможно получение существенного затенения заднего поля источника. Рассмотрены варианты синтеза распределения импеданса экрана. Для относительно больших размеров экрана, в границах применимости предела геометрической оптики, импеданс получается чисто действительным. За границами применимости предела ГО импеданс является комплексным, с неотрицательной действительной частью. Для достижения отсечки порядка -40дБ, радиус экрана достигает порядка 20 длин волн, а для отсечки в -20дБ порядка 2 длин волн. На примере ДН антенной решетки показано, что при помощи вогнутого полупрозрачного экрана, размер которого незначительно превосходит размер решетки, уровень заднего лепестка удается снизить на 15дб, начиная от углов, близких к касательным к плоскости решетки; с увеличением размеров экрана степень подавления заднего излучения нарастает.

Литература

1. Leick A., Rapoport L., Tatarnikov D., GPS Satellite Surveying, 4-th Ed., Wiley, New York, 2015.
2. Вейцель А.В., Вейцель В.А., Татарников Д.В., Аппаратура высокоточного позиционирования по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем: высокоточные антенны, специальные методы повышения точности позиционирования/ Под ред. М.И. Жодзижского, М.: МАИ-ПРИНТ, 2010 – 386 с: ил.

3. Татарников Д.В., Генералов А.А.. Синтез полупрозрачного плоского транспаранта, формирующего ДН с отсечкой. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. №2, 2017. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/feb17/7/text.pdf>
4. Боровиков В.А., Амбарцумова К.А.. Построение параболического зеркала с краем переменной прозрачности. Радиотехника и электроника, №12, 1990
5. Jenn D., Rusch W., Low-Sidelobe Reflector Synthesis and Design Using Resistive Surfaces, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 39, № 9, pp. 1372-1375, 1991
6. Будагян И.Ф., Щукин Г.Г., Моделирование характеристик излучения зеркальных антенн с корректирующим переменным импедансом, М.: Радиотехника, Антенны, №12(91), 2004.
7. Tatarnikov D., Generalov A. Semitransparent Screen for Cutoff of the Far Fields in the Shadow Domain, Progress In Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS), 2017
8. Tretyakov S., Analytical Modeling in Applied Electromagnetics, Artech House, Norwood, 2003.
9. Конторович М.И., Астрахан М.И., В.П. Акимов, Г.А. Ферсман Электродинамика сетчатых структур. – М.: Радио и связь, 1987. – 135 с.
10. Tatarnikov D., Semi-Transparent Ground Planes Excited by Magnetic Line Current, IEEE Antennas and Propagation, v60, №6, pp. 2843-2852, 2012.

Для цитирования:

Д. В. Татарников, А. А. Генералов. Вогнутые полупрозрачные экраны для отсечки поля в зоне тени. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. №1. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jan18/7/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719-2018-1-7