

УДК 621.396.67

АНТЕННА БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ С УМЕНЬШЕННЫМ УРОВНЕМ
БОКОВЫХ ЛЕПЕСТКОВ ЗА СЧЕТ ПЕРЕМЕННОЙ
ФАЗОВОЙ СКОРОСТИ

В.М. Гончаренко, к. т. н., доцент
К.С. Чемесов[®], студент
Е.Б. Третьяков, студент,
С.В. Марьин, заведующий лабораторией

*Кафедра теоретической радиотехники и радиофизики,
Московский технологический университет (МИРЭА), Москва, 119454 Россия*

[®]Автор для переписки, e-mail: Konstantin-chemesov@yandex.ru

Одним из ведущих параметров, характеризующих качество антенн, является уровень бокового излучения, который в ряде случаев должен быть минимально возможным при минимальных габаритах антенны. Целью настоящей работы является нахождение способа уменьшения уровня бокового излучения при неизменных массово-габаритных параметрах антенны. В результате исследования выявлена связь между функцией распределения замедления фазовой скорости вдоль антенны бегущей волны и уровнем бокового излучения. Установлено, что при некоторых законах изменения фазовой скорости вдоль антенны уровень бокового излучения может заметно уменьшаться. На основании численного анализа диаграммы направленностей антенны бегущей волны с замедленной фазовой скоростью, изменяющейся по синусоидальному закону, выявлено уменьшение уровня первого и второго боковых лепестков в 1.5...3 раза по сравнению с обычной оптимальной антенной бегущей волны. Несмотря на уменьшение бокового излучения, коэффициент направленного действия оказывается таким же, как и у обычной антенной бегущей волны с постоянной фазовой скоростью той же длины.

Ключевые слова: антенны, диаграмма направленности, коэффициент направленного действия, уровень бокового излучения, синусоидальный закон.

TRAVELING-WAVE ANTENNA WITH A REDUCED LEVEL
OF SIDE LOBES DUE TO VARIABLE PHASE VELOCITY

V.M. Goncharenko,
K.S. Chemesov[®],
E.B. Tretyakov,
S.V. Maryin

Moscow Technological University (MIREA), Moscow, 119454 Russia

©Corresponding author e-mail: Konstantin-chemesov@yandex.ru

One of the main parameters that characterize the quality of the antenna side lobe level is that in some cases should be the lowest possible with minimum dimensions of the antenna. The aim of this work is to find a method for reducing the side lobe level at constant mass-dimensional parameters of the antenna. The study has found a link between the distribution function of the deceleration phase velocity along the traveling wave antenna and the level of the side lobe. In particular, it was found that under certain laws of the phase velocity changes along the antenna, the level of the side lobe can be reduced significantly. As a result of numerical analysis of directional antennas traveling wave chart with slow phase velocity varying sinusoidally, revealed a decrease in the level of the first and second side lobes 1.5 ... 3 times as compared with the conventional optimum traveling wave antenna. Despite the reduction in the emission side, directional factor is the same as that of a conventional antenna of a traveling wave with a constant phase velocity of the same length.

Keywords: antennas, radiation pattern, directional ratio, the level of the side lobe, sinusoidal law.

Введение

Одним из ведущих параметров, характеризующих качество антенн, является уровень бокового излучения, который в ряде случаев должен быть минимально возможным при минимальных габаритах антенны. Целью настоящей работы является нахождение способа уменьшения уровня бокового излучения при неизменных массово-габаритных параметрах антенны.

В настоящей работе представлены результаты расчетов диаграммы направленности (ДН), коэффициента направленного действия (КНД) и уровня боковых лепестков линейной антенны бегущей волны с переменной замедленной фазовой скоростью $\xi_i(z)$:

$$\xi_i(z) = \frac{c}{V_\phi^i(z)},$$

где c – скорость света, V_ϕ^i – фазовая скорость излучающего тока на излучателе, $V_\phi^i < c$.

Полагается, что излучающие элементы антенны изотропны. Так как в реальных антеннах основной лепесток множителя решетки намного более узкий по сравнению с основным лепестком элемента, то ДН антенны в этой области мало зависит от ДН элемента, и в целом ДН отдельного элемента оказывает малое влияние на ДН и КНД антенны. В расчетах не учитывается, что при изменении замедления $\xi_i(z)$ будет изменяться и амплитуда излучающего тока. В нашем случае это соответствует $p = n < 3 \dots 4$ и $m = 2$.

Замедление $\xi_i(z)$ задается выражением

$$\xi_i(z) = (\xi_i^{opt} \pm p\Delta_i^n) \pm n\Delta_i^n \sin\left(\frac{m\pi z}{L_i}\right),$$

где $\xi_i(z) = 1 + \frac{\lambda_0}{2L_i}$ – замедление на оптимальной антенне; m – любое число, которое задает соотношение длины антенны L_i и длины волны излучающего тока; n и p – целые числа, изменяющиеся от 1 до 10.

В случае $n = p = 0$ рассчитывается оптимальная антенна с $\xi_i^{opt} \Delta_i = k_0(\xi_i^{opt} - 1)$ – интервал постоянного распространения оптимальной антенны длиной L_i и постоянной скоростью распространения в вакууме; k_0 – максимальный интервал замедления, $\Delta_i = \frac{\Delta_i}{N}$ – подинтервал, N – число разбиений максимального интервала, принятое равным 10.

Постоянная распространения излучающего тока $\Gamma_i(z)$ и замедление $\xi_i(z)$ связаны формулой

$$\Gamma_i(z) = k_0 \cdot \xi_i(z) \quad (1)$$

Расчетные формулы

Постоянная распространения излучающего тока $\Gamma_i(z)$ в соответствии с (1) записывается в виде:

$$\Gamma_i^{(2)}(z) = (\Gamma_{opt}^i - p\Delta_i^n) + n\Delta_i^n \sin\left(\frac{mnz}{L_i}\right) \quad (2)$$

$$\Gamma_i^{(3)}(z) = (\Gamma_{opt}^i - p\Delta_i^n) - n\Delta_i^n \sin\left(\frac{mnz}{L_i}\right) \quad (3)$$

$$\Gamma_i^{(4)}(z) = (\Gamma_{opt}^i + p\Delta_i^n) + n\Delta_i^n \sin\left(\frac{mnz}{L_i}\right) \quad (4)$$

$$\Gamma_i^{(5)}(z) = (\Gamma_{opt}^i + p\Delta_i^n) - n\Delta_i^n \sin\left(\frac{mnz}{L_i}\right), \quad (5)$$

где $\Gamma_{opt}^i = k_0 \left(1 + \frac{\lambda_0}{2L_i}\right)$ – постоянная распространения излучающего тока на оптимальной антенне, $(\Gamma_{opt}^i + p\Delta_i^n)$ – среднее значение замедления, $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$ – постоянная распространения в вакууме, $\frac{2\pi}{\lambda_0}$ – длина волны в вакууме, принятая равной 3 см, $L_i = i \cdot \lambda_0$ – длина

антенны в длинах волны, i – любое действительное число.

Расчет ДН и КНД соответственно выполняется по формулам [1, 2]

$$F(\theta) = \int_{z=0}^{L_i} A(z) e^{jk_0 z \cos \theta - j\Gamma_i(z)z} dz, \quad (6)$$

где $A(z)$ – амплитуда тока, принятая равной единице;

$$D_i = \frac{2}{\int_{\theta=0}^{\pi} f_i^2(\theta) \sin \theta d\theta}, \quad (7)$$

где $f_i(\theta)$ – нормированная к своему максимуму ДН.

Расчеты проведены по разработанной программе, а также построены графики соответствующих функций ДН, КНД, уровня боковых лепестков.

Результаты и их обсуждение

Расчеты по формулам (2)–(5) были проведены для вариации постоянной распространения $\Gamma_i(z)$. Длина антенны изменялась в пределах от 0.5 до 10 длин волн, $n = 0 \dots 10$, $m = 0.5 \dots 10$, $p = 0 \dots 5$. Уменьшение бокового излучения наблюдается только при $m = 2$, поэтому далее в статье рассматривается только этот случай.

На рис. 1 приведены ДН антенны в случае расчета постоянной распространения по формуле (2) при $p = 0$, $i = 3$ при различных n .

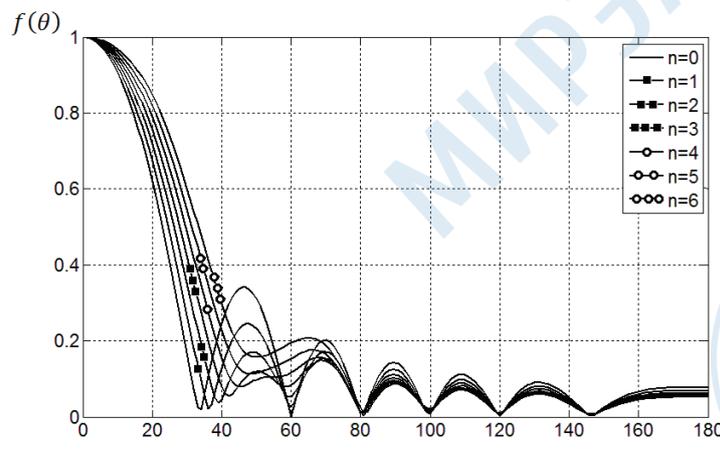


Рис. 1. Диаграммы направленностей антенны в случае (2) при $p = 0$, $i = 3$, $m = 2$ при различных n .

На рис. 2 приведена зависимость относительного уровня первого бокового лепестка ($УБЛ1(2)'$) от переменной n , в случае расчета постоянной распространения по формуле (2), при $p = 0$, $i = 3$

$$УБЛ1(2)' = \frac{УБЛ1(2)}{УБЛ_{opt}}$$

где $УБЛ1(2)'$ – уровень первого бокового лепестка рассчитываемой антенны, $УБЛ_{opt}$ – уровень первого бокового лепестка оптимальной антенны ($УБЛ_{opt} = 0.34$).

На рис. 3 приведена зависимость относительного КНД $D'(2)$ от переменной n , выражаемого формулой

$$D'(2) = \frac{D_i(2)}{D_{opt}}$$

где $D'(2)$ – КНД рассчитываемой антенны при постоянной распространения, рассчитываемой по закону (2), D_{opt} – КНД оптимальной антенны (длина оптимальной антенны равна длине анализируемой, и $n = p = 0$).

Диаграммы направленностей для случаев (2) и (4) при различных значениях i и p при вариации n показаны на рис. 4–7.

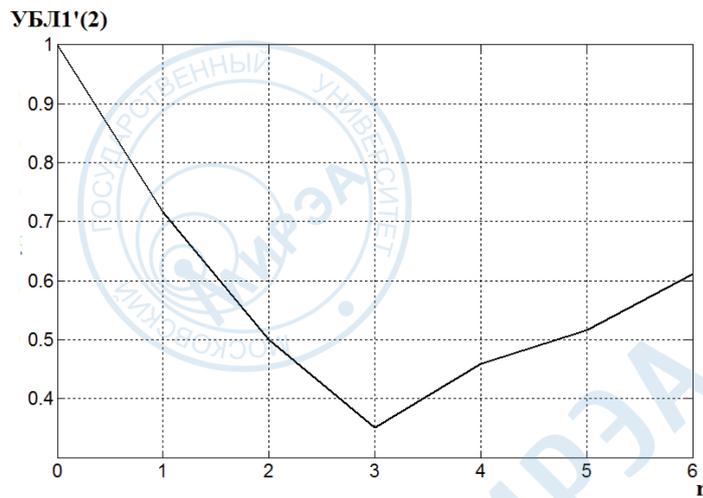


Рис. 2. Зависимость относительного уровня первого бокового лепестка от переменной n в случае (2).

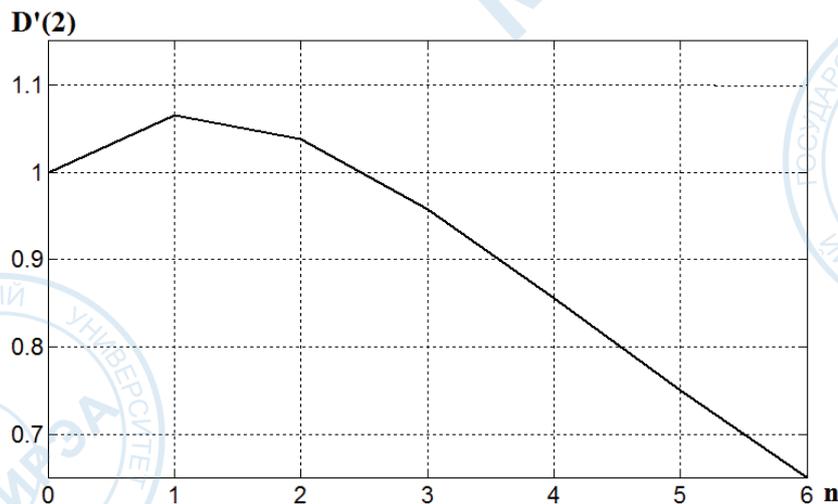


Рис. 3. Зависимость относительного КНД от переменной n .

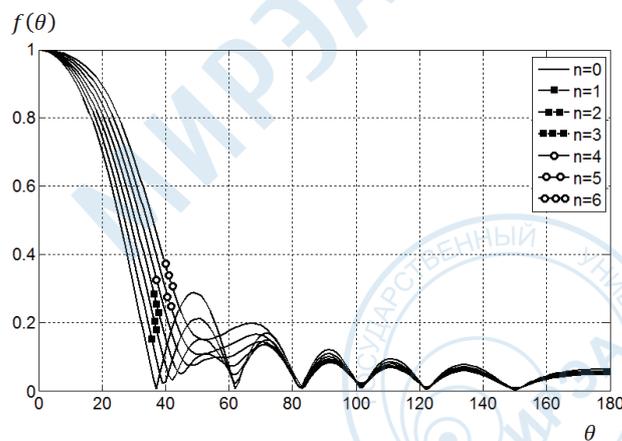


Рис. 4. Диаграммы направленностей антенны в случае (2) при $p = 2, i = 3, m = 2$ при различных n .

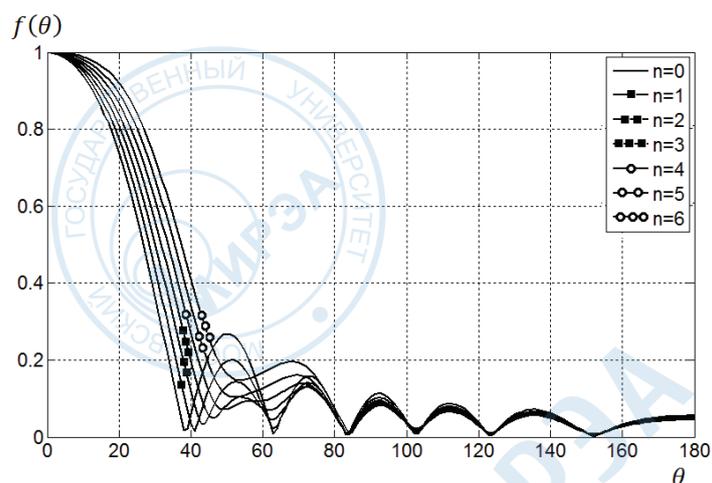


Рис. 5. Диаграммы направленностей антенны в случае (2) при $p = 3, i = 3, m = 2$ при различных n .

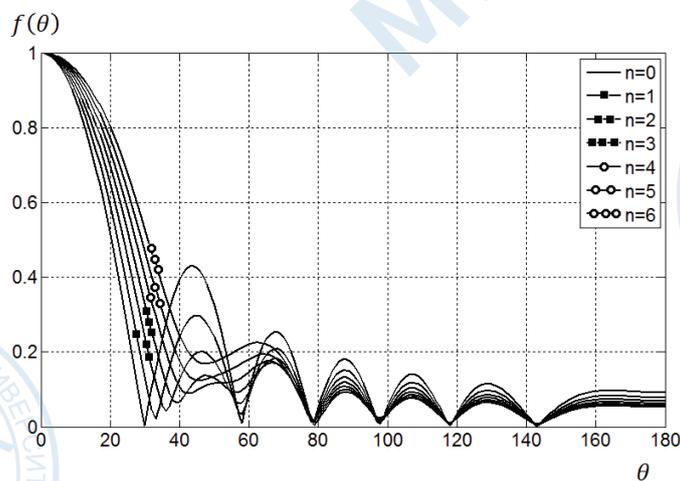


Рис. 6. Диаграммы направленностей антенны в случае (4) при $p = 2, i = 3, m = 2$ при различных n .

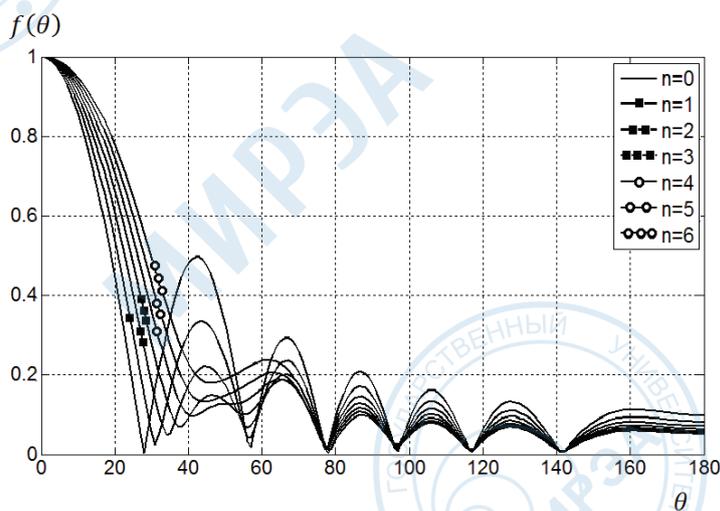


Рис. 7. Диаграммы направленностей антенны в случае (4) при $p = 3, i = 3, m = 2$ при различных n .

Графики зависимостей $УБЛ1(2)(z)$ от n при $p = 1, 2, 3$ для случаев (2) и (4) показаны соответственно на рис. 8 и 10, а графики зависимостей относительного значения $D'(2)$ — на рис. 9 и 11.

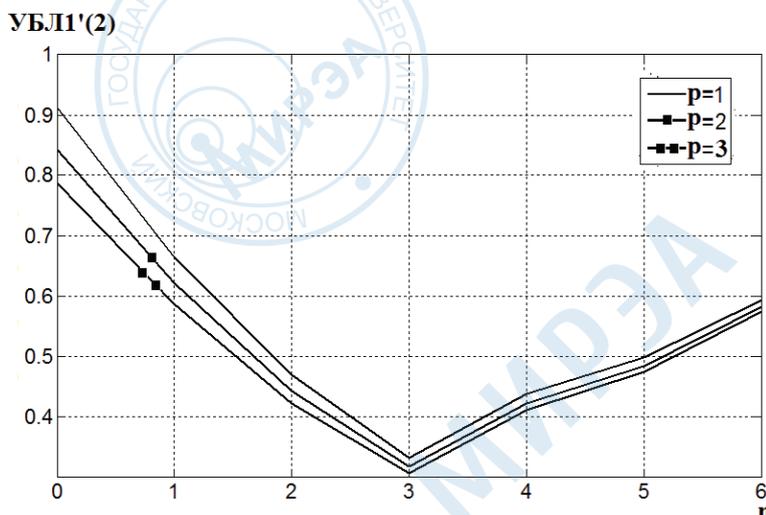


Рис. 8. Графики зависимостей $УБЛ1(2)(z)$ от n для случая (2) при $p = 1, 2, 3$.

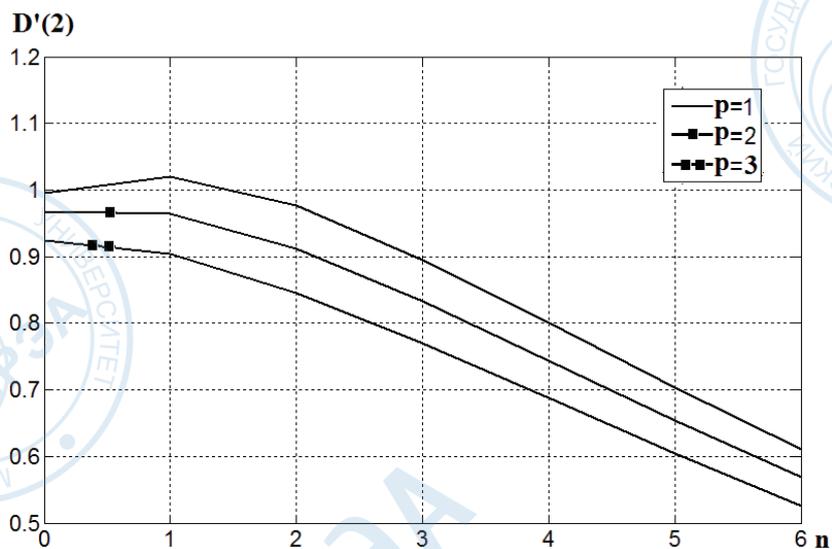


Рис. 9. Графики зависимостей относительного значения $D'(2)$ от n для случая (2) при $p = 1, 2, 3$.

Из приведенных графиков видно, что в рассматриваемых случаях ширина основного лепестка рассчитываемой антенны увеличивается по сравнению с шириной лепестка оптимальной антенны. Направления с нулевым излучением отсутствуют. Только в случае $m = 2, n \leq 4$ и $p \leq 4$ уровень первого и второго лепестков уменьшается в 1.5...3.0 раза при задании $\Gamma_i(z)$ по формулам (2) или (4). В других случаях боковые лепестки всегда растут.

Сравнение результатов расчетов для случаев изменения $\Gamma_i(z)$ по законам (2) и (4) приводит к следующим выводам:

в случае закона (2), при $p = 0$, $УБЛ1$ уменьшается приблизительно в 3 раза, а КНД возрастает приблизительно на 6% при изменении n ;

в случае закона (4), при $p = 1$, $УБЛ1$ уменьшается приблизительно в 3 раза, а КНД возрастает приблизительно на 12% при изменении n ;

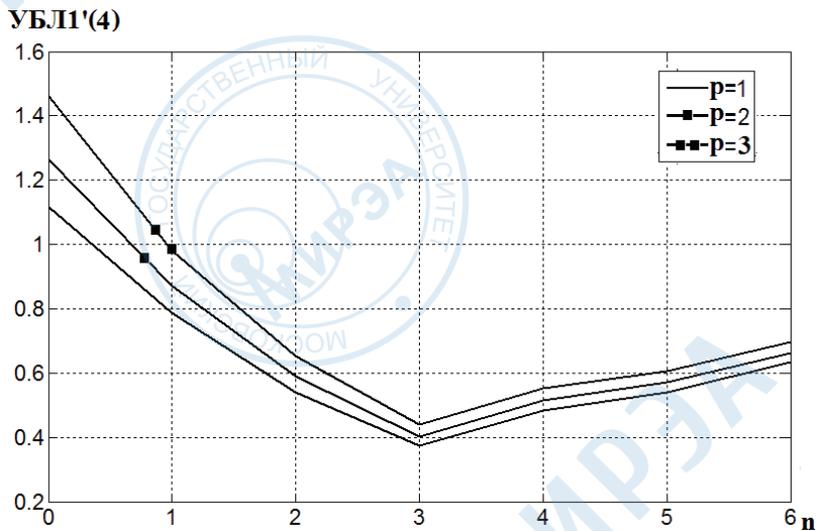


Рис. 10. Графики зависимостей $УБЛ1(4)'(z)$ от n для случая (4) при $p = 1, 2, 3$.

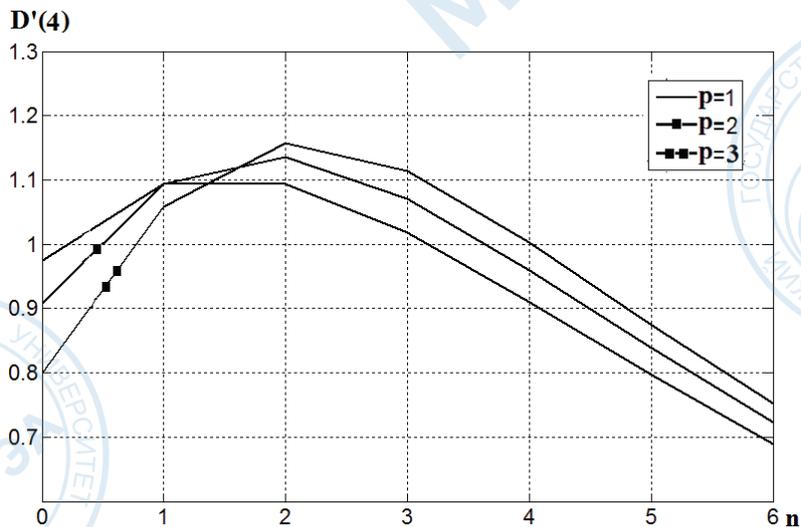


Рис. 11. Графики зависимостей относительного значения $D'(2)$ от n для случая (2) при $p = 1, 2, 3$.

в случае закона (4), при $p = 3$, $УБЛ1$ уменьшается приблизительно в 3.5 раза, а КНД возрастает приблизительно на 15% при изменении n .

Полученные результаты качественно совпадают с общей теорией антенн бегущей волны с постоянной замедленной фазовой скоростью.

В случае, если $\Gamma_i(z)$ изменяется по формуле (2), то среднее значение замедления убывает, что приводит к расширению основного лепестка диаграммы направленности и уменьшению уровня первого бокового лепестка, по сравнению с оптимальной антенной. Здесь согласованно действуют два фактора: замедление $\zeta_i(z)$ изменяется по синусоидальному закону и убывает по отношению к случаю оптимальной антенны, при $m = 2$ и малых значениях переменных n и p .

Следует отметить, что в случае, когда замедление растет в начале антенны (у точки питания, как в случаях (2) и (4)), уровень бокового излучения рассчитываемой антенны становится меньше, чем у оптимальной. КНД в этом случае не меньше, чем у оптимальной, что коррелирует с синтезированными антеннами, описанными в [5], однако их электрические параметры оказываются существенно выше, чем в нашем случае.

Выводы

В случае изменения $\Gamma_i(z)$ по законам (2) и (4) более предпочтительным является закон (4).

В этом случае КНД рассчитываемой антенны в области $n \leq 4$ возрастает на 15% по отношению к КНД оптимальной антенны, а уровень первого бокового лепестка уменьшается в 1.5–2.5 раза.

Таким образом, возникает возможность создания антенны, у которой габаритные размеры будут такими же, как у оптимальной антенны, уровень первого бокового лепестка станет меньше, чем у оптимальной, в 1.5-2.5 раза, а КНД будет больше на 15%.

В случае (2) уровень первого бокового лепестка будет в 3 раза меньше, но КНД также уменьшится примерно на 15% при $n \leq 2, p \leq 3$.

Полученные результаты при одинаковых законах постоянной распространения $\Gamma_i(z)$ не зависят от переменной i при равных p и n .

Литература:

1. Фрадин А.З. Антенны сверхвысоких частот. М.: Связь, 1977. 440 с.
2. Никольский В.В. Антенны. М.: Связь, 1966. 368 с.
3. Воскресенский Д.И. Антенны и устройства СВЧ. М.: Советское Радио, 1972. 315 с.
4. Кюн Р. Микроволновые антенны. М.: Судостроение, 1967. 518 с.
5. Айзенберг Г.З. Антенны УКВ. Т.1. М.: Связь. 1977. 699 с.
6. Терешин О.Н., Седов В. М., Чаплин А. Ф. Синтез антенн на замедляющих структурах. М.: Связь, 1980. 136 с.
7. Нефедов Е.И. Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства. М.: Академия, 2010. 320 с.
8. Гончаренко В.М., Чемесов К.С., Третьяков Е.Б. Антенна бегущей волны с переменной замедленной фазовой скоростью, с уменьшенным уровнем бокового излучения / Сб. научных трудов Школы молодых ученых «Перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем» РАДИОИНФОКОМ-2015, Москва, 14–18 апреля 2015 г., МИРЭА. С. 5–10.