

УДК 621.396.67.012.12

Я.О. Белевщук, С.В. Кукобко, С.В. Нечитайло, О.И. Сухаревский

Объединенный научно-исследовательский институт Вооруженных Сил, Харьков

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ ЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННОЙ СИСТЕМЫ С УЧЕТОМ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Предложена методика математического моделирования диаграммы направленности радиолокационной станции (РЛС). Проведены расчеты ДН РЛС обнаружения целей боевой машины 2С6. Разработанная методика расчета базируется на основе метода физической оптики и учитывает влияние подстилающей поверхности.

зеркальная антенна, диаграмма направленности

Постановка проблемы и анализ литературы

Благодаря интенсивному развитию средств вычислительной техники становится возможным еще на этапе проектирования антенных систем (АС) с помощью математических моделей их прототипов смоделировать электродинамические процессы, протекающие во время их работы. К числу наиболее важных параметров, определяющих характеристики АС, относится амплитудная диаграмма направленности (ДН) по полю $F(\theta, \varphi)$, где θ – угол места, φ – азимут.

На практике часто возникает задача расчета амплитудной диаграммой направленности зеркальных АС с учетом подстилающей поверхности. В инженерной практике для расчета диаграмм направленности антенн наиболее часто используется метод физической оптики (ФО). В данной статье для нахождения поверхностных токов на зеркале также используется метод ФО [1].

Предлагается методика, которая, в отличие от применяемых ранее, позволяет учесть в комплексе такие факторы, как затенение раскрыва антенны блоком излучателей и переотражение от подстилающей поверхности, представляющей собой диэлектрическое полупространство с параметрами земли.

При этом используется выражение для комплексного векторного коэффициента отражения, равномерно пригодного для любых углов падения, в том числе и близких к нормальным [2].

Цель работы – разработать методику математического моделирования амплитудной ДН зеркальной АС с учетом подстилающей поверхности и проанализировать результаты моделирования ДН на примере станции обнаружения целей (СОЦ) боевой машины (БМ) зенитного пушечно-ракетного комплекса (ЗПРК) "Тунгуска".

Основной материал

Основные расчетные соотношения. Рассмотрим зеркальную антенну (ЗА), расположенную на высоте h от поверхности земли, моделируемой как полупространство с относительной диэлектрической ϵ' и магнитной μ' проницаемостями. В дальней зоне результирующее поле ЗА в присутствии земли образуется в результате сложения поля, распространяющегося непосредственно в направлении \vec{R}^0 , и поля, переотраженного от подстилающей поверхности (рис. 1).

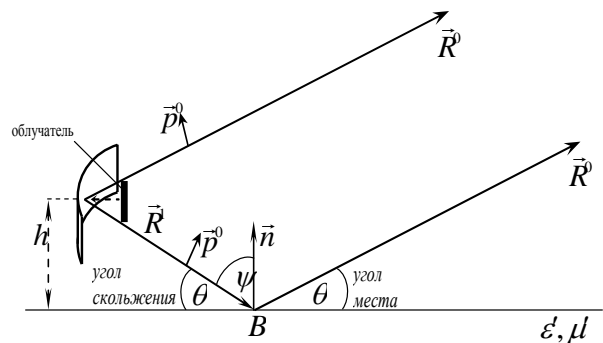


Рис. 1. Пути распространения волны при наличии подстилающей поверхности.

Для расчета поля \vec{E} , создаваемого зеркалом в дальней зоне, воспользуемся его интегральным представлением [2], где второе слагаемое под знаком интеграла учитывает отражение волны от подстилающей поверхности:

$$\begin{aligned} \vec{p}\vec{E}(\vec{R}^0) = & -i\Omega(k_0 x_0)k_0^2 \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \cdot \\ & \cdot \int_S \left[\vec{p}^0 \exp(-ik_0(\vec{R}^0 \cdot \vec{X})) + \right. \\ & \left. + \vec{p}^1 \exp(-ik_0((\vec{R}^0 - \vec{R}^1) \cdot \vec{c} + \vec{R}^1 \cdot \vec{X})) \right] \cdot \vec{H}_\perp(\vec{X}) dS, \end{aligned} \quad (1)$$

где ϵ_0, μ_0 – электрическая и магнитная постоянные; \vec{E} – вектор искомого электрического поля; $\vec{H}_\perp = (\vec{n} \times \vec{H})$ – плотность поверхностного тока на S ; k_0 – волновое число ($k_0 = 2\pi/\lambda$, где λ – длина волны излучения); $\vec{R}^0 = (\sin \theta, \sin \varphi \cos \theta, \cos \varphi \cos \theta)$ – единичный вектор направления на точку наблюдения; $\vec{R}^1 = \vec{R}^0 - 2\vec{n} \cdot (\vec{R}^0 \cdot \vec{n})$ – единичный вектор направления на точку В отражения от подстилающей поверхности; $\Omega(k_0 x_0) = \frac{1}{4\pi} \frac{\exp(ik_0 x_0)}{k_0 x_0}$, где x_0 – расстояние от центра антенны до точки наблюдения; \vec{p}^0 – единичный вектор, характеризующий поляризацию отраженной от зеркала волны (рис. 1); \vec{p} – единичный вектор, характеризующий поляризацию приемной антенны; \vec{p}^1 – комплексный векторный коэффициент отражения волны от подстилающей поверхности, рассчитываемый по формулам [3]:

$$\vec{p}^1 = \vec{p}_T^1 - n \frac{(\vec{p}_T^1 \cdot \vec{R}^0)}{\cos \psi}; \quad (2)$$

$$\vec{p}_T^1 = \frac{(q \cos \psi - 1)}{(q \cos \psi + 1)} \vec{p}_T^0 + \frac{2q}{q \cos \psi + 1} \times \left[\vec{R}_T^0 \frac{\vec{R}_T^0 \cdot \vec{p}}{q + \cos \psi} + \vec{R}_\perp^0 \cdot \vec{R}_\perp^0 \cdot \vec{p} / \left(\epsilon' \cdot \mu' \left(q + \frac{\cos^2 \psi_1}{\cos \psi} \right) \right) \right]; \quad (3)$$

$$q = \sqrt{\frac{\mu'}{\epsilon'}} \cos \psi_1; \quad \cos^2 \psi_1 = 1 - \frac{\sin^2 \psi}{\epsilon' \mu'}; \quad \vec{R}_\perp^0 = (\vec{n} \times \vec{R}^0);$$

$$\vec{R}_T^0 = \vec{R}^0 - \vec{n} \cdot (\vec{R}^0 \cdot \vec{n}); \quad \vec{p}_T^0 = \vec{p} - \vec{n}(\vec{p} \cdot \vec{n});$$

\vec{c} – вектор, характеризующий фазовое запаздывание, возникающее при наличии подстилающей поверхности; ψ – угол между \vec{R}^1 и \vec{n} (рис. 1); \vec{n} – нормаль к подстилающей поверхности.

Формулы (2) и (3) позволяют рассчитывать коэффициент отражения для любых углов падения, в том числе и близких к нормальным.

Поверхность интегрирования S в (1) можно представить в виде суммы двух частей: первая – „освещенная” облучателем поверхность зеркала (на рис. 2 обозначена как S_Σ) и вторая – тыльная сторона зеркала (на рис. 2 обозначена как S_0). Таким образом, вся поверхность $S = S_\Sigma + S_0$.

Пусть облучатель создает у поверхности зеркала следующее электромагнитное поле [4]:

$$\vec{E}^0(\vec{X}) = \frac{jk_0}{4\pi} \vec{p}' \frac{\exp[jk_0 |\vec{X} + \vec{\rho}|]}{|\vec{X} + \vec{\rho}|} F_{\text{обл}}(\vec{X}); \quad (4)$$

$$\vec{H}^0(\vec{X}) = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \frac{jk_0}{4\pi} (\vec{R}^0 \times \vec{p}') \frac{\exp[jk_0 |\vec{X} + \vec{\rho}|]}{|\vec{X} + \vec{\rho}|} F_{\text{обл}}(\vec{X}),$$

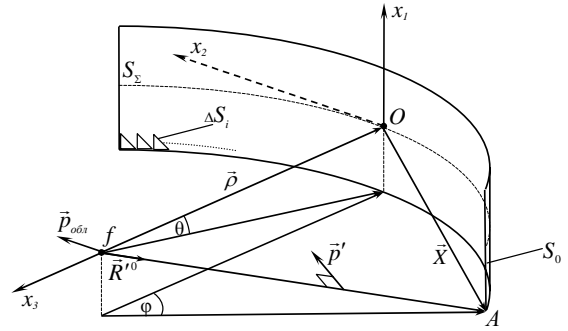


Рис. 2. Геометрия задачи.

где $F_{\text{обл}}(\vec{X})$ – функция, характеризующая ДН облучателя в пространстве; \vec{p} – радиус-вектор, направленный из фокуса f в вершину зеркала $t.O$ (рис. 2); \vec{X} – радиус-вектор произвольной точки A на зеркале; \vec{R}^0 – единичный вектор, направленный вдоль луча, проведенного из фокуса f в точку A на поверхности зеркала; $\vec{p}' = \frac{\vec{R}^0 \times (\vec{p}_{\text{обл}} \times \vec{R}^0)}{|\vec{R}^0 \times (\vec{p}_{\text{обл}} \times \vec{R}^0)|}$ – единичный вектор,

характеризующий поляризацию волны, падающей в направлении \vec{R}^0 , $\vec{p}_{\text{обл}}$ – единичный вектор, характеризующий поляризацию облучателя (рис. 2).

В нашем случае $\vec{p}_{\text{обл}} = (0, 1, 0)$.

Вычисление поля по формуле (1) будем проводить в приближении физической оптики, т.е. затеканием токов на тыльную сторону S_0 будем пренебрегать. Тогда $S = S_\Sigma$, а выражение для тока на этой поверхности будет иметь вид [1]:

$$\vec{H}_\perp(\vec{X}) = 2[\vec{n}(\vec{X}) \times \vec{H}^0(\vec{X})]. \quad (5)$$

С учетом (4) и (5) (1) преобразуется к виду:

$$\vec{p}\vec{E}(\vec{R}^0) = \frac{\exp(ik_0 x_0) k_0^2}{8\pi^2 x_0} \int_{S_\Sigma} \frac{\vec{n} \times (\vec{R}^0 \times \vec{p}')}{|\vec{X} + \vec{\rho}|} F(\vec{X}) \cdot \left[\vec{p}^0 \exp(ik_0 (|\vec{X} + \vec{\rho}| - (\vec{R}^0 \cdot \vec{X}))) + \vec{p}^1 \exp(ik_0 (|\vec{X} + \vec{\rho}| - ((\vec{R}^0 - \vec{R}^1) \cdot \vec{c} + \vec{R}^1 \cdot \vec{X}))) \right] dS. \quad (6)$$

Анализ выражения (6) показывает, что подынтегральная функция имеет быстроосциллирующий множитель. Поэтому предложено вычислять интеграл (6) с помощью специальных кубатурных формул [5]. Применение таких формул требует разбиения поверхности S_Σ на малые плоские треугольные площадки ΔS_i , i – номер треугольника, $i = 1 \dots n$, где n – количество треугольников (рис. 2). При этом поле, рассеянное зеркалом антенны, определяется как сумма полей, рассеянных каждой треугольной площадкой [5].

Амплитудную ДН антенны будем рассчитывать по формуле [6]

$$F(\theta, \varphi) = |\vec{p}\vec{E}(\vec{R}^0)|. \quad (7)$$

При расчете поля антенны в дальней зоне предложено учитывать эффект затенения зеркала антенны облучателем. Перед вычислением поля, отражаемого отдельным треугольником ΔS_i , проводится луч из центра треугольника в направлении на точку наблюдения. Если луч пересекает облучатель, то этот треугольник исключается из рассмотрения.

Таким образом, методика математического моделирования амплитудной ДН антенны сводится к применению метода ФО для расчета рассеяния электромагнитной волны, порожденной облучателем антенны, на зеркале АС с учетом отражения от подстилающей поверхности (земли).

Результаты математического моделирования и их анализ. Проведем математическое моделирование ЗА и ее ДН на примере СОЦ РЛС 1РЛ144 БМ ЗПРК "Тунгуска".

Антенна СОЦ состоит из зеркала, выполненного в виде вырезки из параболического цилиндра и блока излучателей, геометрические размеры которых приведены на рис. 3 [7].

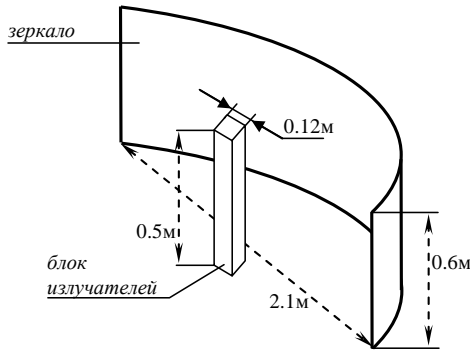


Рис. 3. Геометрия ЗА СОЦ

Высота центра зеркала над землей равна 3,5 м. При моделировании ДН антенны СОЦ был учтен наклон зеркала АС на угол места 7° , поэтому максимум ДН смещен по оси углов места на эту величину. На рис. 4 приведены рассчитанные по формулам (6, 7) нормированные амплитудные ДН ЗА СОЦ в угломестной плоскости для облучателя с ДН $F_{обл}(\vec{X})=1$ и без учета подстилающей поверхности, т.е в выражении (6) принято $\vec{p}^1 = 0$, для случая учета затенения облучателем зеркала антенны (пунктирная линия) и без учета затенения (сплошная линия). Обе ДН нормированы к максимуму ДН без учета затенения.

Анализ кривых на рис. 4 показывает, что учет затенения зеркала облучателем приводит к снижению максимума амплитудной ДН ЗА приблизительно на 8 %.

На рис. 5 представлена нормированная амплитудная ДН ЗА с учетом подстилающей поверхности с параметрами сухого суглинка

$$(\epsilon' = 3 + j0,4 \quad \mu' = 1 + j0).$$

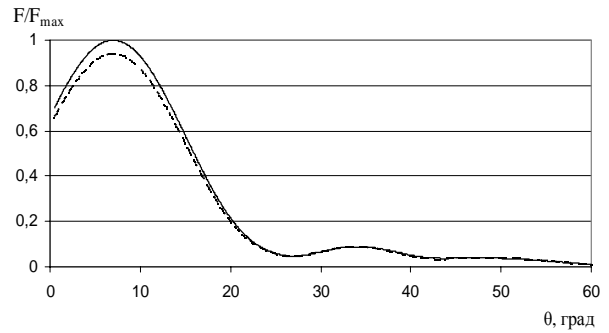


Рис. 4. Влияние затеняющего эффекта на амплитуду ДН

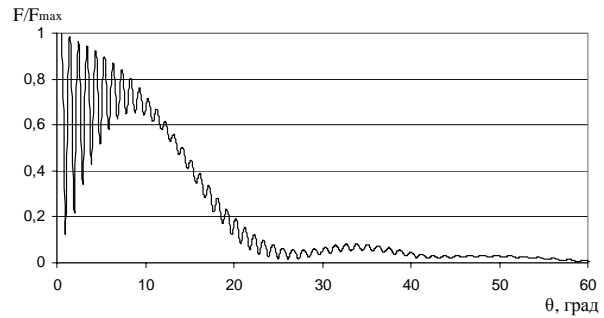


Рис. 5. Нормированная ДН ЗА с учетом подстилающей поверхности (сухой суглинок)

Как видно из рис. 5, ДН ЗА имеет быстроосциллирующий характер. Количество лепестков m зависит от высоты поднятия ЗА над землей h , длины волны λ и диапазона рассматриваемых углов места [8]:

$$m = \frac{2 \cdot h}{\lambda} \sin \theta. \quad (8)$$

Количество лепестков, рассчитанные по выражению (8) для диапазона углов $\theta = 0 - 10^\circ$, $\lambda = 0,12\text{м}$ и $h = 3,5\text{м}$ равно 10, что соответствует результатам расчетов, представленных на рис. 5.

На рис. 6 представлены графики изменения модуля коэффициента отражения (КО) электромагнитной волны от подстилающей поверхности с горизонтальной поляризацией для двух типов подстилающей поверхности – мокрой земли ($\epsilon' = 30 + j0,6 \quad \mu' = 1 + j0$) и сухого суглинка ($\epsilon' = 3 + j0,4 \quad \mu' = 1 + j0$).

Анализ кривых рис. 6 показывает, что при углах места, близких к 0° , коэффициенты отражения данных двух видов почв практически равны 1. Увеличение угла места точки наблюдения приводит к увеличению угла скольжения θ (рис. 1). При этом увеличивается поглощение землей энергии электромагнитной волны. Это поясняет уменьшение амплитуды осцилляций в ДН при увеличении угла места (угла скольжения) точки наблюдения.

На амплитуду осцилляций результирующего поля также оказывают влияние относительная диэлектрическая ϵ' и магнитная μ' проницаемости грунта. Так, амплитуда осцилляций будет выше в присутствии мокрой земли, вследствие поглощения ею меньшей энергии, чем сухой суглинок.

На рис. 7 приведена діаграма направленности рассматриваемой ЗА в угломестной плоскости в присутствии подстилающей поверхности с параметрами мокрой земли.

Анализ поведения кривой на рис. 7 показывает, что амплитуда осцилляций например в диапазоне углов 20–30° в среднем составляет 0,07, а для сухого суглинка (рис. 5) – 0,06. Это объясняется тем, что КО (рис. 6) для мокрой земли больше, чем для сухого суглинка во всем диапазоне углов θ .

Облучатель АС СОЦ состоит из шести полосковых вибраторных излучателей, разнесенных в угломестной плоскости [7]. ДН каждого из них описывается с помощью функции [6]

$$F_{обл\ k}(\alpha) = A_k F_0[\alpha], \quad (8)$$

где $A_k = \Delta_1 + (1 - \Delta_1) \cos(\pi x_k / d)$ – амплитуда поля k-го излучателя; $k = 1 \dots 6$; d – расстояние между крайними излучателями; ($0 \leq \Delta_1 \leq 1$); x_k – координата k-го излучателя по оси x_1 (рис. 2);

$$F_0[\alpha] = \frac{1}{\Delta_2 + \frac{2}{\pi}(1 - \Delta_2)} \left[\Delta_2 \frac{\sin \alpha}{\alpha} + \frac{1 - \Delta_2}{2} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\cos \alpha}{1 - \left(\frac{2}{\pi} \alpha\right)^2} \right] -$$

ДН отдельного излучателя в горизонтальной плоскости [12]; $\alpha = \frac{\pi L}{\lambda} \sin \theta$; $L = \frac{\lambda}{2}$ – длина вибратора; ($0 \leq \Delta_2 \leq 1$).

На рис. 8 показано расширение ДН ЗА СОЦ для случая отсутствия подстилающей поверхности. Результаты расчета ДН антенны для случая одного

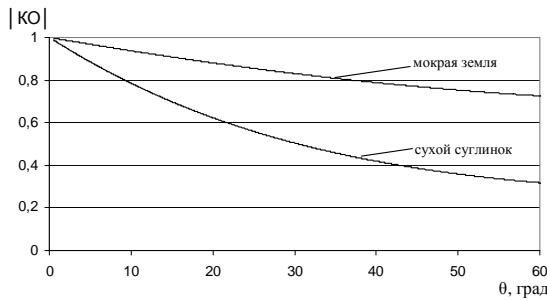


Рис. 6. Модуль КО (горизонтальная поляризация)

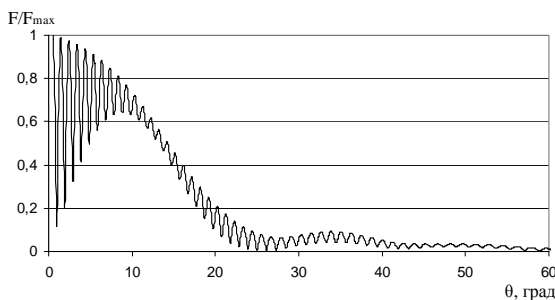


Рис. 7. Нормированная ДН ЗА с учетом подстилающей поверхности – мокрой земли

излучателя с ДН $F_{обл}(\vec{X})=1$ представлены штрих-пунктирной кривой, а для случая блока излучателей с ДН $F_{обл}(\vec{X})=F_{обл\ k}(\alpha)=A_k F_0[\alpha]$ представлены сплошной кривой.

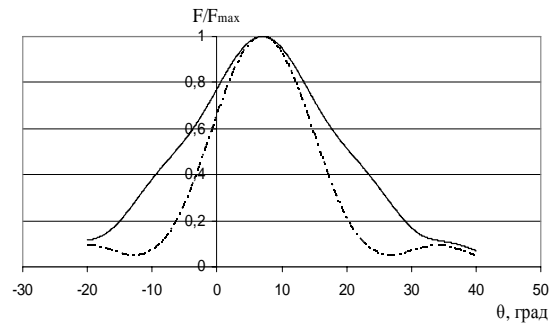


Рис. 8. Нормированная ДН ЗА для двух типов облучателей.

Расширение ДН антенны объясняется тем, что линейка из шести излучателей создает спадающее к краю амплитудное распределение в угломестной плоскости. На рис. 9 представлена нормированная ДН ЗА в присутствии подстилающей поверхности – мокрой земли, для блока из шести излучателей с ДН, вычисленной по формуле (8) с $\Delta_1 = 0$.

Амплитуда осцилляций ДН модели ЗА, имеющей блок излучателей (рис. 9), в области малых углов $0^\circ < \theta < 25^\circ$ увеличилась в сравнении с ДН, приведенной на рис. 7, что объясняется расширением ДН вследствие спадания амплитуды поля к краю зеркала антенны в угломестной плоскости (сплошная линия на рис. 8). В результате в направлении подстилающей поверхности будет распространяться поле большей амплитуды (в сравнении с упрощенной моделью, где $F_{обл}(\vec{X})=1$), что и является причиной увеличения амплитуды осцилляций ДН. Увеличение уровня ДН в области отрицательных углов (направление „в землю”) объясняет возросшую амплитуду осцилляций ДН вблизи $\theta = 0^\circ$ (рис. 9).

Результаты расчетов также показали, что в случае подстилающей поверхности – сухого суглинка амплитуда осцилляций меньше, чем для мокрой земли. Однако отличия составляют не более 4%, поэтому график ДН для сухого суглинка не приводится.

На рис. 10 приведены ДН ЗА в азимутальной плоскости для различных углов места θ с учетом подстилающей поверхности – мокрой земли ($\epsilon' = 30 + j0,6$ $\mu' = 1 + j0$). Анализ кривых рис. 10 показывает, что ДН в этом случае не имеет осциллирующего характера. Это обусловлено тем, что угол места, под которым будет наблюдаться ДН, фиксированный. Следовательно, разность фаз прямого и отраженного от земли полей при сложении будет постоянной, что, в свою очередь, исключает осцилляцию амплитуды поля. Однако подстилающая поверхность будет оказывать влияние на уровень значений ДН антенны в зависимости от величины угла места наблюдения θ (рис. 10).

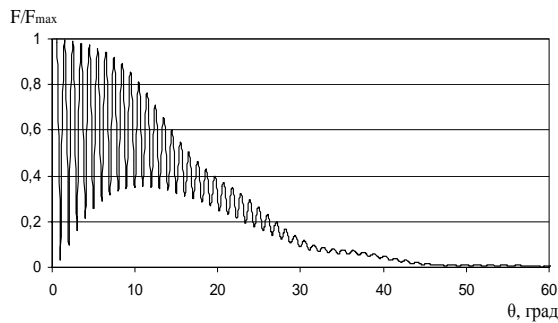


Рис. 9. Нормированная ДН ЗА в присутствии мокрой земли

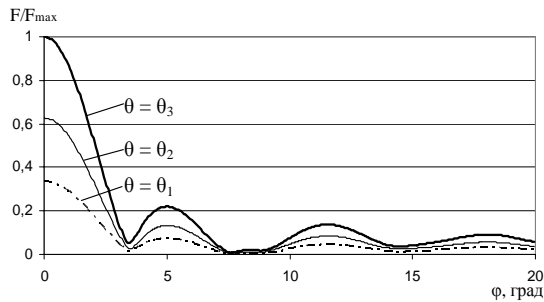


Рис. 10. Нормированная ДН ЗА в азимутальной плоскости

Сравнение результатов расчета ДН антенны по предложенной методике для АС СОЦ БМ 2С6 с данными, взятыми из [7], показало адекватность разработанной модели ДН ЗА реальной антенне СОЦ БМ 2С6.

Выводы

1. Предложена методика математического моделирования амплитудной ДН РЛС с зеркальной АС с учетом затенения раскрыва антенны блоком излучателей и переотражения от подстилающей поверхности.

Результаты моделирования показывают, что наличие подстилающей поверхности приводит к осцилляциям ДН антенны в угломестной плоскости.

2. Величина амплитуды ДН антенны зависит от параметров диэлектрической и магнитной проницаемости подстилающей поверхности, а также от угла места наблюдения.

Список литературы

1. Уфимцев П.Я. Теория дифракционных краевых волн в электродинамике. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. – 366 с.
2. Фундаментальные и прикладные задачи теории рассеяния электромагнитных волн / Сиренко Ю.К., Сухаревский И.В., Сухаревский О.И., Яшина Н.П.; под ред. Сиренко Ю.К. – Х.: Крок, 2000 – 344 с.
3. Сухаревский О.И., Василец В.А., Сазонов А.З., Ткачук К.И. Расчет рассеяния электромагнитной волны на идеально проводящем объекте, частично покрытом радиопоглощающим материалом, с помощью триангуляционных кубатурных формул // Радиофизика и радиоастрономия. – 2000. – Т. 5, № 1. – С. 47-54.
4. Бахрах А.Д., Галимов Г.К. Зеркальные сканирующие антенны. – М.: Наука, 1981. – 302 с.
5. Сухаревский О.И., Василец В.А., Горельшиев С.А., Нечитайло С.В. Ткачук К.И. Эффективная поверхность рассеяния (ЭПР) объектов с неидеально отражающей поверхностью, имеющей изломы // Зарубежная радиоэлектроника. – 2001. – № 6. – С. 41-48.
6. Шифрин Я.С. Антенны. – Х.: ВИРТА, 1976. – 408 с.
7. Изделие 1РЛ144. Техническое описание. ЦА1.640.001.ТО. – 1982.
8. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн. – М.: Сов. радио, 1972. – 464 с.

Поступила в редколлегию 11.09.2007

Рецензент: д-р техн. наук, ст. научн. сотр. В.И. Антиофеев, Объединенный научно-исследовательский институт Вооруженных Сил, Харьков.