

КПД ФАЗИРОВАННЫХ РЕШЕТОК ДИПОЛЬНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ, РАСПОЛОЖЕННЫХ НАД ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

ПАНЧЕНКО Ю.А.

Рассматривается изменение КПД вертикальных антенных решеток, расположенных над поверхностью, параметры которой соответствуют параметрам основных типов земной поверхности, которые используются при аналогичных расчетах [9].

Моделирование проводится на основании методики, которая разработана ранее в работах [10, 11]. Данная методика адаптирована для определения КПД вертикальных решеток, составленных из диполей различных типов [12].

Введение

Отражение и поглощение радиоволн, распространяющихся над земной поверхностью, существенно влияет на характеристики приземных антенн. В настоящее время существует необходимость в продолжении анализа параметров направленных антенн, работающих вблизи земной поверхности, разработки программ для расчета реальных конструкций. Кроме того, необходим и качественный анализ, который позволяет оптимизировать конструкции и методики расчета.

Взаимодействие электромагнитных волн с поверхностью земли приводит к существенным изменениям параметров приземных антенн. Это особенно проявляется в диапазоне коротких волн, потому что в этом случае расстояние от поверхности до излучателя соизмеримо с длиной волны. Несмотря на значительное внимание исследователей к этой области и длительную историю ее изучения [1-8], в ней остается достаточное количество вопросов, которые требуют дальнейшего рассмотрения. Это обусловлено как сложностью структуры электромагнитного поля, формируемого направленными антеннами, так и еще более сложными процессами взаимодействия волн с неровной, неоднородной, анизотропной подстилающей поверхностью. Но и в простом случае плоской поверхности и однородного, изотропного полупространства ряд вопросов требуют внимания, в частности, вопрос

КПД фазированных решеток, составленных из излучателей различного типа. Актуальность данного вопроса обусловлена необходимостью минимизации энергопотребления, сокращения техногенного воздействия на окружающую среду и перспективой создания радиоканалов для передачи энергии.

1. Предварительные условия и постановка задачи

Основной физической механизм снижения КПД антенн, расположенных над землей, обусловлен прохождением электромагнитных волн в нижнее полупространство, в котором энергия электромагнитного поля полностью поглощается. Оставшаяся в пространстве над землей энергия определяется коэффициентом отражения и диаграммой направленности (ДН) антенны. Под влиянием погодных условий электрофизические свойства земли изменяются в широких пределах. Значительное влияние на параметры приземных антенн оказывает как изменение проводимости земли, так и изменение ее диэлектрической проницаемости. Не менее важным является вопрос распространения радиоволн над морской поверхностью.

При расчетах использована замена малых вибраторов, из которых составляются реальные фазированные антенные решетки (ФАР) диполями, соответственно электрического и магнитного типа. Данное приближение допустимо, поскольку расстояние между вибраторами меньше, чем длина волны, и диаграмма направленности вибратора незначительно влияет на общую ДН всей системы.

Геометрическая схема расположения решетки и лучевая картина формирования электромагнитного поля представлена на рис. 1.

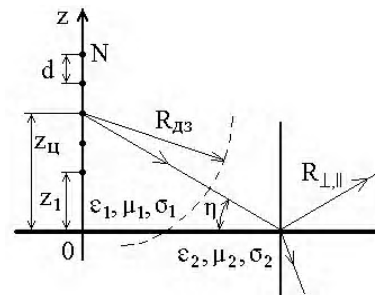


Рис. 1. Схема прохождения лучей

Для проведения расчетов выбраны следующие исходные данные. В верхнем полупространстве ($z > 0$) параметры среды соответствуют параметрам вакуума: диэлектрическая проницаемость $\epsilon_1 = \epsilon_0$, магнитная проницаемость $\mu_1 = \mu_0$, удельная проводимость $\sigma_1 = 0$. В нижнем полупространстве ($z < 0$) – диссипативная среда, у которой $\mu_2 = \mu_0$, остальные параметры, изменяются в соответствии с [9], а именно: сухая земля – $\epsilon_0 = 4$, $\sigma = 10^{-4}$ см/м, влажная земля – $\epsilon_0 = 10$, $\sigma = 10^{-2}$ см/м и морская вода – $\epsilon_0 = 40$, $\sigma = 5$ см/м. Геометрические размеры ФАР даны относительно длины волны в свободном пространстве.

Электрический диполь представляет собой короткую нить тока, имеющего по всей длине постоянную величину и фазу (I_0^3). У магнитного диполя вдоль нити течет магнитный ток I_0^M . Распределение возбуждающих токов в диполях вдоль решетки равномерное по амплитуде, фаза изменяется по закону: $I_n^{3,M} = I_0^{3,M} e^{jn\zeta}$, где ζ – сдвиг фаз между токами соседних диполей.

При расчетах рассматривается только вертикальная ориентация диполей, поскольку для решеток горизонтальных диполей действуют те же физические факторы, но зависимости выражены менее ярко.

КПД решеток определялся как отношение мощности, излученной в верхнее полупространство (см. рис.1) P_{Σ} , к мощности P_{in} , поступающей от источников – P_{Σ}/P_{in} . Мощность, которая пересекает границу раздела и рассеивается в нижнем полупространстве, является потерянной. При этом предполагается, что в самих диполях потери энергии отсутствуют.

2. Анализ КПД вертикальных решеток

Основное отличие поведения КПД решеток вертикальных электрических диполей (ВЭД) и вертикальных магнитных диполей (ВМД) вызвано различиями в коэффициентах отражения для электромагнитных волн, которые имеют параллельную и перпендикулярную поляризацию относительно плоскости падения – R_{\parallel} и R_{\perp} . В качестве исходных зависимостей, соответствующих идеальному случаю, можно взять зависимости коэффициента отражения мощности остронаправленного луча, падающего из верхнего полупространства, которые представлены на рис.2.

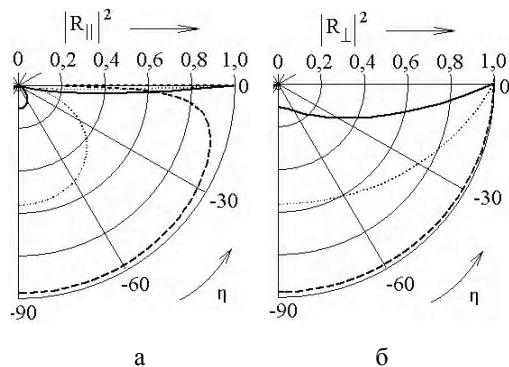


Рис. 2. Коэффициент отражения мощности остронаправленного луча

Поле луча параллельной поляризации (рис.2,а), формируемое решеткой электрических диполей, соответствует полю луча перпендикулярной поляризации, формируемому решеткой магнитных диполей. Здесь на рис. сплошной линией показаны зависимости для сухой земли ($\epsilon_0 = 4$, $\sigma = 10^{-4}$ см/м), пунктирной – для влажной ($\epsilon_0 = 10$, $\sigma = 10^{-2}$ см/м), штриховой – для морской воды ($\epsilon_0 = 40$, $\sigma = 5$ см/м).

Из графиков следует, что по энергетическим параметрам наиболее плохим является случай сухой земли. Увеличение проводимости и диэлектрической проницаемости среды приводит к увеличению отраженной мощности и, соответственно, улучшению энергетических характеристик.

В отличие от [12], изменения КПД на графиках здесь будут представлены в зависимости от угла склонения главного лепестка ДН ФАР. Это не нарушит преемственности представления, так как в [12] рассматривались решетки, у которых расстояние между элементами было равно $\lambda/2$, поэтому угол фазировки, который определяет направление синфазного сложения полей отдельных излучателей, соответствовал углу места главного максимума множителя решетки. Однако в режиме антенны бегущей волны (АБВ) это приводило к тому, что задний лепесток был равен основному. В данном случае при рассмотрении остронаправленных антенн расстояние между излучателями выбрано $\lambda/4$, при этом задний лепесток ФАР в режиме подавлен.

Для остронаправленных антенн, расположенных высоко над поверхностью, зависимости КПД от угла склонения должны приближаться к зависимостям отраженной мощности (рис.3).

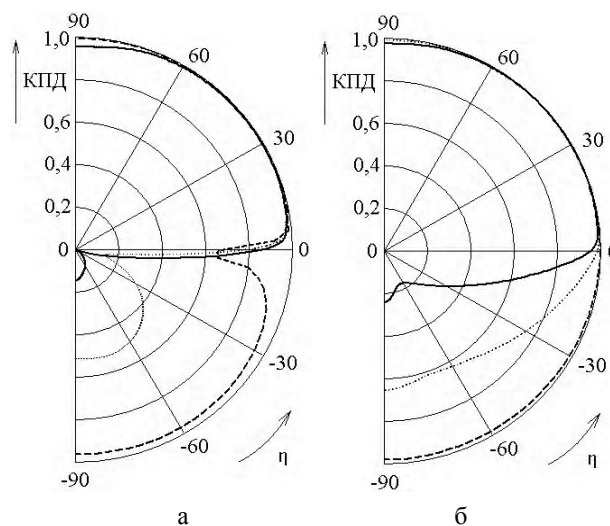


Рис. 3. Зависимости КПД для остронаправленных приподнятых решеток ($N=40$, $d=0,25\lambda$, $z_1=10\lambda$): а – ВЭД, б – ВМД

В целом результаты расчетов при ориентации главного лепестка ДН в нижнее полупространство соответствуют зависимостям отраженной мощности $|R_{\parallel}|^2$ и $|R_{\perp}|^2$ остронаправленного луча (см. рис.2). Можно

отметить, что на зависимости КПД решетки электрических диполей менее четко, чем на зависимости коэффициента отражения остронаправленного луча, выражен нуль на направлении угла Брюстера. Это вызвано распространением энергии в боковых лепестках. На зависимости для решетки ВМД есть некоторое увеличение КПД при ориентации ее ДН вертикально вниз. Это вызвано, во-первых, некоторым расширением главного лепестка, которое происходит при переходе решетки к режиму АБВ, во-вторых, также боковыми лепестками, которые имеются у ДН реальных антенн. Кроме того, для обеих решеток КПД несколько снижается при ориентации их ДН вертикально вверх. Это также вызвано суммарным увеличением энергии боковых лепестков ДН решеток, работающих в режиме АБВ, по сравнению с ее уровнем при синфазном возбуждении.

Завершение формирования ДН антенны происходит на некотором расстоянии от ее апертуры. Поэтому далее рассмотрим влияние реальной земной поверхности на этот процесс.

Зависимости КПД для остронаправленных решеток при малом расстоянии от поверхности показаны на рис. 4.

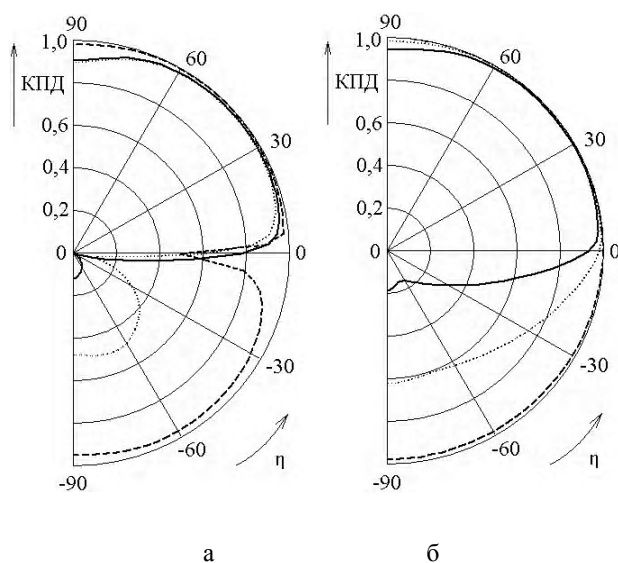


Рис. 4. Зависимости КПД для остронаправленных, расположенных вблизи земли, решеток ($N=40$, $d=0,25 \lambda$, $z_1=0,25 \lambda$): а – ВЭД; б – ВМД

Можно отметить, что по сравнению с предыдущим случаем изменение достаточно слабое. Здесь нижнее полупространство частично перекрывает зону Френеля и ближнюю зону. Однако это влияние незначительно, поскольку, как известно [16], оценка расстояния дальней зоны, в которой ДН уже сформирована, по фазовому критерию при приближении направления главного максимума ДН решетки к ее оси уменьшается в соответствии с $L^2 \lambda^{-1} \cos^2 \eta$, где L – длина решетки. Поэтому здесь в большей мере оказывает влияние амплитудный критерий, действие которого сказывается не так резко, как фазового [16].

Далее представлены зависимости КПД для слабонаправленной решетки (рис.5).

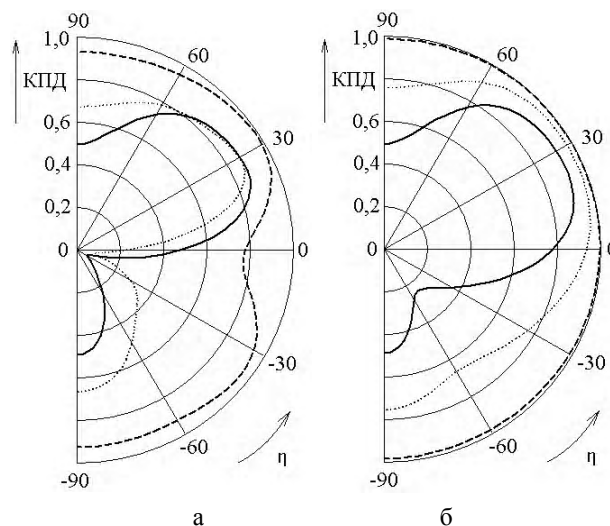


Рис. 5. Зависимости КПД для слабонаправленных решеток ($N=4$, $d=0,5 \lambda$, $z_1=0,25 \lambda$): а – ВЭД; б – ВМД

В этом случае расстояние между вибраторами выбрано равным $\lambda/2$, что позволяет сопоставить данные результаты с результатами, полученными ранее.

В целом характер зависимостей соответствует результатам, представленным, например, в [12]. Решетка ВМД для всех значений угла и параметров поглощающего пространства имеет больший КПД, чем решетка ВЭД. Это объясняется в целом большим коэффициентом отражения мощности для перпендикулярной поляризации, что при всех значениях параметров увеличивает мощность в верхнем полупространстве.

Максимальное значение КПД наблюдается при направлении главного максимума ДН под некоторым углом к поверхности, при котором уровень боковых лепестков, направленных в нижнюю полусферу, минимален.

Минимальное значение КПД (при углах $\eta = -30^\circ \dots -50^\circ$) для решеток ВЭД и ВМД имеет разную физическую природу. Для решетки ВЭД это объясняется наличием угла Брюстера. Для решетки ВМД это вызвано значительным расширением главного лепестка ДН, которое происходит при приближении режима работы решетки к режиму АБВ. При этом большая часть мощности, излучаемой решеткой, сосредотачивается в нижней полусфере. В режиме антенны бегущей волны оба типа решеток имеют одинаковый КПД в обоих вертикальных направлениях.

Выводы

Поведение полученных зависимостей хорошо объясняется поведением коэффициентов отражения для параллельной и перпендикулярной поляризации. Во всех случаях большим КПД обладают решетки ВМД. Для обоих типов решеток отсутствует необходимость значительного их подъема над поверхностью при ориентации главного лепестка ее ДН в верхнее полупространство.

В данной работе не рассматривались горизонтальные решетки, поскольку они имеют не столь ярко выраженные зависимости. Это объясняется тем, что их диаграммы направленности симметричны относительно горизонтальной оси. Дополнительные расчеты показали, что у горизонтальных решеток в основном сохраняется соотношение потерь для поля, имеющего горизонтальную и вертикальную поляризации, поскольку их характеристики определяются теми же физическими факторами.

Литература: 1. *Wait J. R.* The magnetic dipole over the horizontally stratified earth // Canadian J. of Physics. 1951. Vol.29, №6. P.577-592. 2. *Moorthy B. S.* Analysis of a circular loop antenna over a homogeneous earth // Bell S.T.I. 1970. Vol.49, №.6. P.1215-1233. 3. *Ito S., Inagaki N., Sekiguchi R.* An investigation of the array of circular-loop antennas // IEEE Trans. on Antennas and Propagat. 1971. Vol.19. №4. P.464-476. 4. *Губанов В.С.* Входное сопротивление элементарных вибраторов, расположенных над полупроводящей почвой // Сб. «Антенны». Под ред. А.А.Пистолькорса. 1973. Вып.17. С.56-60. 5. *Содин Л. Г.* Энергетические характеристики антенн, расположенных вблизи границы раздела // Антенны. 1974. Вып. 20. С. 70-78. 6. *P.Parhami, R.Mitra.* Wire Antennas over a Lossy Half-Space // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 1980. Vol. 28, № 3. P.397-403. 7. *Lindell I. R., Alanen E.* Exact Image theory for the Sommerfield Half-Space Problem. Part I.: Vertical Magnetic Dipole // IEEE Trans. on Antennas and Propagat. 1984. Vol.32, №2. P.126-

132. 8. *Kassem A. S. A.* On array of two circular loop antennas above a dissipative half-space // Proc. of the Mediter. Electrotechn. Conf. (MELECON 85). Madrid. 1985. Vol.3. P.153-156. 9. *Hansen P.M.* The radiation efficiency of a dipole antenna located above an imperfectly conducting ground // IEEE Trans. on Antennas and Propagat. 1972. Vol. 20, №4. P. 766 -770. 10. *Токарский П.Л.* Взаимные сопротивления и КПД электрических диполей, расположенных вблизи поверхности раздела двух сред // Радиофизика и радиоастрономия. 1998. Т.3, № 4. С.434-440. 11. *Токарский П.Л.* Взаимные сопротивления между горизонтальными электрическими диполями на границе раздела двух сред // Радиотехника. 2001. Вып. 121. С.15-18. 12. *Токарский П.Л., Панченко Ю.А.* КПД решеток магнитных излучателей, расположенных над границей раздела двух сред // Радиотехника. 2006. Вып. 146. С.83-89. 13. *Лавров Г.А., Князев А.С.* Приземные и подземные антенны. М.: Сов. радио, 1965. 472 с. 14. *Марков Г.Т., Чаплин А.Ф.* Возбуждение электромагнитных волн. М.-Л.: Энергия, 1967. 376 с. 15. *Справочник по антенной технике. Т1 /* Под ред. Я.Н.Фельда и Е.Г. Зелкина. М.: ИПРЖР, 1997. 256 с. 16. *Марков Г.Т., Сазонов Д.М.* Антенны. М.: Энергия, 1975. 528 с.

Поступила в редколлегию 12.06.2010

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. Дорошенко В.А.

Панченко Юрий Александрович, ассистент кафедры основ радиотехники ХНУРЭ. Научные интересы: теория антенн, программирование. Адрес: Украина, 61736, Харьков, пр. Ленина, 14, тел.: (057) 702-14-30.