

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА КПД ВЕРТИКАЛЬНЫХ РЕШЕТОК ДИПОЛЬНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ, РАСПОЛОЖЕННЫХ НАД ДИССИПАТИВНЫМ ПОЛУПРОСТРАНСТВОМ

ПАНЧЕНКО Ю.А.

Определение КПД антенных устройств на стадии проектирования является важным этапом создания эффективных конструкций. Подстилающая поверхность существенно влияет на параметры решеток приземных антенн. В статье рассматриваются физические механизмы, обуславливающие потери мощности излучаемого поля. Результаты анализа позволяют провести качественное сравнение ФАР, работающих вблизи поглощающей по-

верхности, и могут быть полезны на стадии выбора конструкций.

Введение

Антенны, выполненные в виде решеток отдельных излучателей (ФАР), являются одним из наиболее распространенных типов антенн. Расположение ФАР вблизи границы раздела двух сред, в частности у поверхности земли, вносит существенные коррективы в их параметры.

Несмотря на то, что изучению свойств одиночных излучателей и их систем посвящено достаточное число публикаций [1-8], ряд вопросов в настоящее время исследованы недостаточно. К ним относится влияние поглощающей среды на энергетические характеристики антенных решеток из электрических и магнитных диполей, а именно, на их КПД. Учитывая необходимость уменьшения энергопотребления, повышения экологической безопасности и возможность переда-

чи энергии по радиоканалам, данная тема является актуальной.

Настоящая статья посвящена анализу и сравнению КПД сканирующих вертикальных антенных решеток, расположенных над границей поглощающей среды. Целью исследования является попытка объяснения физических механизмов воздействия проводимости земли на изменение энергетических характеристик, в частности, КПД антенн.

При численном моделировании использована методика, разработанная в работах [9, 10] и адаптированная в работе [11] для решения аналогичных задач решеток магнитных диполей.

1. Постановка задачи и условия решения

В общем случае характер изменения свойств земли, как подстилающей поверхности, весьма сложен, и учет всех факторов потребует значительного увеличения объема работы. Потому анализ ограничен влиянием изменения проводимости земли, что, на наш взгляд, является наиболее существенным.

Вертикальные решетки диполей (рис. 1) соответствуют решетке, выбранной в [11]. Электрические и магнитные диполи в решетках ориентированы либо вертикально (рис. 1,а), либо горизонтально (рис. 1,б).

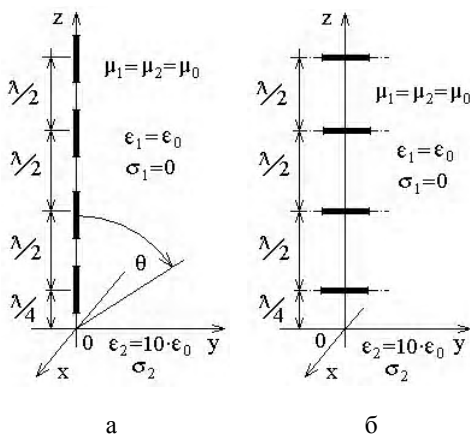


Рис. 1. Схема расположения диполей

Плоскость $z = 0$ разделяет пространство на две части. Верхнее полупространство ($z > 0$) заполнено однородной средой 1 с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_1 = \epsilon_0$, магнитной проницаемостью $\mu_1 = \mu_0$ и удельной проводимостью $\sigma_1 = 0$ (вакуум), а нижнее полупространство ($z < 0$) представляет собой диссипативную среду 2, у которой $\mu_2 = \mu_0$, остальные параметры могут быть произвольными. Рабочая частота f_0 выбрана равной 6 МГц.

Распределение токов в решетках равномерное по амплитуде и прогрессивное по фазе: $I_n^{3,M} = I_0^{3,M} e^{jn\xi}$, где ξ – сдвиг фазы между токами соседних диполей.

Электрический диполь представляет собой короткую нить тока, имеющего по всей длине постоянную величину и фазу (I_0^E). У магнитного диполя вдоль нити течет магнитный ток I_0^M .

С учетом поставленной задачи для дальнейших расчетов было выбрано значение относительной диэлектрической проницаемости среды 2, равное $\epsilon_2 = 10$, а величине σ_2 придавалось три значения: 0,1, 0,01 и 0,001 сим/м. Это соответствует значениям $\text{tg}\delta_2$, равным: 30, 3 и 0,3. Дополнительные расчеты показали, что этого набора значений достаточно, чтобы полностью охарактеризовать поведение результирующих зависимостей КПД решеток.

Материалы с такими $\text{tg}\delta$ по качественным оценкам занимают положение от «плохого» проводника, до «плохого» диэлектрика. Поэтому при анализе полей в таких материалах нельзя пренебрегать как действительной, так и мнимой частью коэффициента распространения $\tilde{k}_2 = 2\pi f_0 \sqrt{\epsilon_2 \epsilon_0 \mu_0 (1 - j \text{tg}\delta_2)}$.

Для дальнейших рассуждений будет полезно привести здесь иллюстрацию волнового процесса в материалах, имеющих такие значения величины затухания (рис. 2).

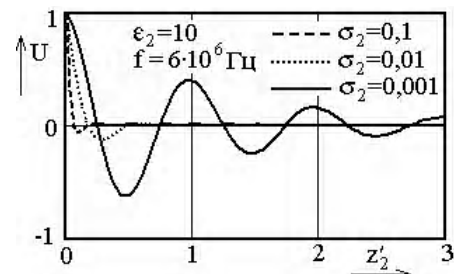


Рис. 2. Затухающие волны в поглощающей среде

Здесь расстояние z_2 нормировано к длине волны в среде 2 при $\sigma_2 \rightarrow 0$ и соотносится с вертикальными размерами рисунка 1 как: $z'_2 = -z/\lambda_2$ где $\lambda_2 = 1/f_0 \sqrt{\epsilon_2 \epsilon_0 \mu_0}$. Для данных условий $\lambda_2 \approx 17$ м.

2. Методика решения задачи

Процедура определения КПД решеток электрических и магнитных диполей при сканировании луча в вертикальной плоскости аналогична разработанной в [11]. Поэтому здесь только кратко охарактеризуем ее основные этапы.

КПД излучающей системы определяется как отношение $\eta = P_\Sigma / P_{in}$ излученной мощности P_Σ и мощности P_{in} , поступающей от источников при условии, что амплитуды и фазы токов диполей заданы и что в самих диполях потери энергии отсутствуют. Тогда мощность, поступающая от внешних источников, полностью излучается во внешнее пространство. При этом она делится на две части $P_{in} = P_\Sigma + P_d$, одна из которых (P_Σ) уходит вместе с расходящимися сферическими волнами в верхнее полупространство, а другая (P_d) – пересекает границу раздела и рассеивается в нижнем полупространстве. Мощность P_Σ считается полезной, а P_d – потерянной. Для определения их значений используется метод вектора Пойнтинга. Поверхностью интегрирования в первом случае является

верхняя полусфера бесконечного радиуса, во втором – плоскость раздела двух сред $z = 0$.

Вывод соотношений для определения КПД основан на свойстве аддитивности ЭМП, которое позволяет выразить напряженности электрического и магнитного полей в виде суммы трех слагаемых. Первое описывает поле диполя в свободном пространстве, второе – отраженное от идеально проводящего экрана, третье учитывает отличие реальной среды 2 от идеального проводника [12].

При вычислении пространственного распределения ЭМП отдельного диполя используется разложение в спектр плоских волн [13], что позволяет сравнительно просто определить коэффициенты прохождения и отражения волн от границы.

После этого, на основании метода наводимых электро- и магнитодвижущих сил [14], определяются входные интегральные параметры диполей – сопротивления для электрических диполей и проводимости для магнитных. При этом выделяются составляющие, обусловленные распространением волн в свободном пространстве, отражением от идеального экрана и учитывающие реальные параметры среды 2. Электродинамический принцип перестановочной двойственности позволяет унифицировать аналитическую процедуру на этом этапе.

Соответствующее отношение между действительными частями полученных таким образом интегральных параметров является искомым значением КПД.

Не дублируя результаты, приведенные в [11], обратимся к численному расчету, анализу и физической интерпретации процессов формирования пространственных распределений параметров и поведения выходных характеристик.

3. Анализ КПД решеток вертикальных диполей

Так же как и в [11], изменение КПД представлено в зависимости от угла фазирования $\theta = \arccos(\xi/k_0d)$, который определяет направление синфазного сложения полей отдельных излучателей, т.е. направление главного максимума множителя решетки. Это позволит сохранить преемственность результатов.

Зависимости КПД решетки вертикальных электрических диполей (ВЭД) показаны на рис.3,а; соответствующие зависимости для вертикальных магнитных диполей (ВМД) – на рис.3,б.

На рис.3 и на следующих рисунках сплошной линией показаны зависимости для $\sigma_2 = 0,001 \text{ сим/м}$, пунктирной – для $\sigma_2 = 0,01 \text{ сим/м}$ и штриховой для $\sigma_2 = 0,1 \text{ сим/м}$.

Дополнительные расчеты показали, что в этом и в последующих случаях уменьшение проводимости не приводит к существенному изменению зависимостей КПД по сравнению с представленными для $\sigma_2 = 0,001 \text{ сим/м}$, так что эти зависимости можно принять как асимптоты при $\sigma_2 \rightarrow 0$. Физически это

объясняется тем, что при $\sigma_2 < 0,001 \text{ сим/м}$ коэффициент отражения от границы определяется в основном значением действительной части диэлектрической проницаемости среды 2, а вся мощность прошедшего ЭМП безвозвратно рассеется в виде тепла, независимо от того, какой глубины достигает ее основная часть.

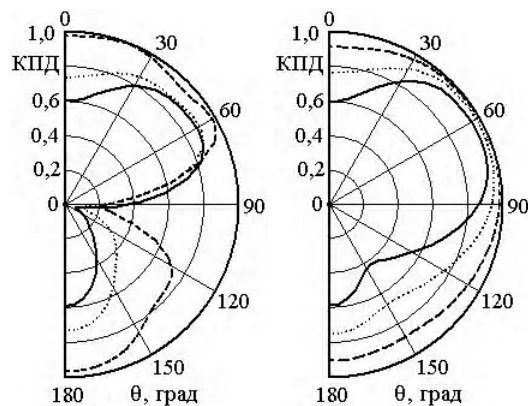


Рис. 3. КПД решеток вертикальных диполей

Увеличение проводимости во всех случаях устремляет значение КПД к 100%, что также соответствует физическим представлениям.

Поглощение энергии излучаемого ЭМП определяется токами в среде, заполняющей нижнее полупространство. Поэтому для дальнейшей интерпретации необходимо привести распределение токов в среде 2. Согласно рис.2 наибольшее поглощение энергии ЭМП будет происходить в поверхностном слое, поэтому ограничимся изображением распределения токов проводимости на поверхности и в некоторых случаях на малой глубине. Чтобы упростить физическую интерпретацию, нужно учесть следующее. Характер распределения токов на поверхности земли (или экрана) определяется типом диполя, его ориентаций в пространстве. Решетка формирует главный и боковые лепестки ДН, что может изменить направления движения токов в отдельных участках на противоположные, соотношение их амплитуд. Поэтому для качественной оценки ограничимся токами, возбуждаемыми одиночными диполями.

Распределение токов, наведенных электрической и магнитной компонентами ЭМП (I_E^H и I_M^H), для ВЭД и ВМД соответственно показано на рис.4, а, б.

При возбуждении пространства электрическим диполем токи в каждом кольце на поверхности шириной $\lambda/2$ текут по радиальным траекториям, при возбуждении магнитным диполем – по азимутальной.

Наибольшее отличие графики КПД (рис.3) имеют при $\theta \approx 90^\circ$, причем поглощение энергии для электрического диполя существенно больше. Можно выделить два механизма, обуславливающих данное отличие. Первый объясняется поглощением энергии ЭМП из

пограничного слоя над поверхностью. Электрические токи на поверхности проводящей среды указывают на то, что имеется тангенциальная компонента электрического поля E_τ . Поскольку в пространственной структуре ЭМП ВЭД имеется только азимутальная составляющая вектора \vec{H} , которая относительно поверхности также является тангенциальной, то совместно с E_τ она формирует нормальную к поверхности компоненту вектора Пойнтинга (Π_n), т.е. уходящий вниз поток энергии. Он подпитывается энергией главного лепестка ДН. По мере удаления от источника и ослабления ЭМП в пограничном слое ДН антенны будет изменяться, пока весь поток энергии (или большая часть) не ограничится верхним полупространством (при $\theta = 0$ и $\sigma_2 \rightarrow 0$ КПД $\approx 41\%$). У приземного ВМД вектор поля \vec{H} вблизи поверхности расположен практически вертикально, поэтому величина Π_n будет существенно меньше (при $\theta = 0$ и $\sigma_2 \rightarrow 0$ КПД $\approx 87\%$).

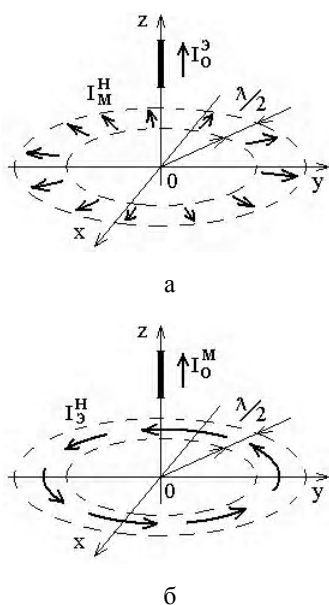


Рис. 4. Структура токов на поверхности, возбуждаемых вертикальными диполями

Второй механизм обуславливает последующее уменьшение КПД при $\theta > 90^\circ$, которое можно объяснить уменьшением коэффициента отражения при углах, близких к углу Брюстера (φ_B). При $\varepsilon_2 = 10$ и $\sigma_2 \rightarrow 0$ $\varphi_B = 72,5^\circ$, что в выбранной системе координат соответствует $\theta^{(B)} = 107,5^\circ$, а минимальный КПД = 6,1% достигается при $\theta_{\min} = 104,5^\circ$.

Дальнейшее поведение зависимостей КПД (см. рис.3) в большей степени объясняется поведением множителя решетки. Максимальное значение КПД при $\theta \approx 60^\circ$ для обоих типов диполей достигается тогда, когда первый нуль множителя решетки ориентирован параллельно границе раздела и $\Pi_n \rightarrow 0$. При $\theta = 0^\circ$ и $\theta = 180^\circ$ КПД одинаков, так как решетка превращается в антенну бегущей волны (АБВ), у которой при выбранных параметрах главный и задний лепестки

одинаковы. Снижение КПД при $0 < \theta < 60^\circ$ обусловлено поглощением мощности заднего лепестка, который в этом секторе при $\theta \rightarrow 0$ должен увеличиваться.

4. Анализ КПД решеток горизонтальных диполей

Зависимости КПД решеток горизонтальных электрических и магнитных диполей (ГЭД) и (ГМД) показаны на рис.5 а, б.

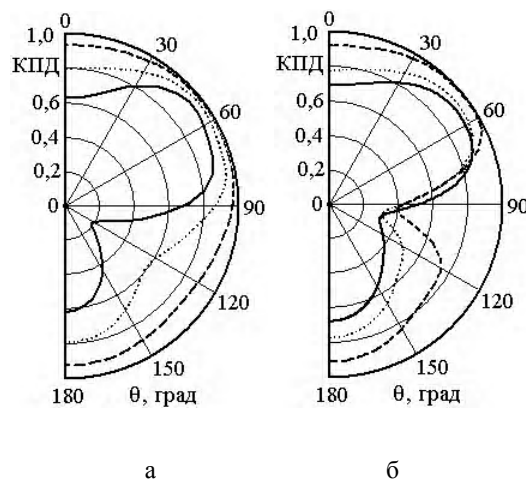


Рис. 5. КПД решеток горизонтальных диполей

Структура поверхностных токов при возбуждении поглощающего полупространства горизонтальными диполями более сложная, чем у вертикальных. На рис.6, а представлены токи, наводимые в среде 2, ГЭД, на рис.6, б – ГМД. В целом механизмы поглощения энергии излучения решеток горизонтальных и вертикальных диполей аналогичны, поэтому на них останавливаться не будем, а сосредоточимся лишь на некоторых особенностях.

В зависимости от того, как расположены диполи в решетках, изменяется соотношение мощностей в боковых и главном лепестках, поскольку результирующая ДН определяется произведением ДН элемента на множитель решетки. В этом случае излучение отдельного электрического или магнитного диполя максимально в плоскости ХОZ, что должно было бы привести к большому поглощению мощности ЭМП. Однако существуют компенсирующие механизмы.

Распределение наведенных токов ГЭД (рис.6, а) похоже на распределение токов ВМД, что обусловило аналогичное поведение КПД при $\theta \leq 90^\circ$. Но для того чтобы замкнуть линии наведенного тока I_3^H , на поверхности должны возникнуть токи замыкания. Их распределение соответствует распределению магнитной компоненты ЭМП в пространстве, поэтому они обозначены I_M^H . При $\theta = 90^\circ$ КПД достаточно высок, для $\sigma_2 = 0,001$ сим/м КПД $\approx 70\%$. Однако это меньше чем у ВМД, что обусловлено потерями энергии волн, распространяющихся в направлении оси У и вблизи него. При $\theta > 90^\circ$ и малом σ_2 минимум КПД решетки ГЭД наблюдается в случае, когда главный лепесток

полностью расположен в секторе $\theta > 90^\circ$. В этом секторе поведение КПД у решеток ГЭД и ВМД также похоже и совпадение улучшается при увеличении σ_2 . Так же хорошо совпадают случаи АБВ.

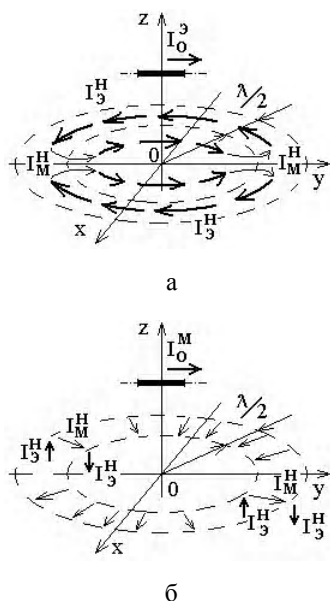


Рис. 6. Токи, наводимые горизонтальными диполями

Аналогичная ситуация возникает при сравнении поведения КПД решеток ГМД и ВЭД. Это обусловлено тем, что токи на поверхности в обоих случаях имеют радиальную структуру. Увеличение пути наведенных токов (добавление вертикальной компоненты I_3^H – рис.6, а) вносит дополнительное сопротивление, поэтому потери КПД у решетки ГМД в несколько раз меньше, чем у решетки ВЭД, например, при $\theta = 90^\circ$ КПД $\approx 45\%$, поскольку механизм поглощения волн, непосредственно прилегающих к поверхности раздела, не будет работать в направлении оси ГМД. В секторе $\theta > 90^\circ$ поведение КПД ГМД обусловлено влиянием угла Брюстера, так как электрическое поле приподнятого ГМД имеет значительную параллельную компоненту.

Поскольку структура полей и токов при возбуждении пространства решетками горизонтальных диполей не является осесимметричной, то при удалении от антенны вследствие неравномерного поглощения мощности ДН будет изменяться более сложным образом, чем у решеток вертикальных диполей. Однако обсуждение этих вопросов выходит за рамки данной работы.

Выводы

Основное внимание уделено рассмотрению физических эффектов, определяющих возможности указан-

ного типа антенн. Как указано выше, данный анализ не претендует на полноту, так как физические механизмы более многочисленны и разнообразны, чем рассмотренные в работе. Например, можно рассчитывать на существенное улучшение поданного материала, которое может быть получено при анализе фазовых соотношений наведенных токов. И несмотря на то, что эти результаты не улучшат расчетных моделей антенных решеток, формирование адекватных физических представлений в будущем может быть полезными на стадии предварительной оценки и выбора оптимального типа приземных антенн.

Литература: 1. Parhami P., Mittra R. Wire Antennas over a Lossy Half-Space // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 1980. Vol. 28, № 3. С.397-403. 2. Седин Л.Г. Энергетические характеристики антенн, расположенных вблизи границы раздела // Антенны. 1974. Вып. 20. С. 70-78. 3. Wait J. R. The magnetic dipole over the horizontally stratified earth // Canadian J. of Physics. 1951. Vol.29, №6. С.577-592. 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. Moorthy B. S. Analysis of a circular loop antenna over a homogeneous earth // Bell S.T.I. 1970. Vol.49, №6. С.1215-1233. 6. 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. С.464-476. 7. Lindell I. R., Alanen E. Exact Image theory for the Sommerfeld 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. An array of two circular loop antennas above a dissipative half-space // Proc. of the Mediter. Electotechn. Conf. (MELECON 85). Madrid. 1985. Vol.3. С.153-156. 9. Токарский П.Л. Взаимные сопротивления и КПД электрических диполей, расположенных вблизи поверхности раздела двух сред // Радиопизика и радиоастрономия. 1998. Т.3, №4. С.434-440. 10. Токарский П.Л. Взаимные сопротивления между горизонтальными электрическими диполями на границе раздела двух сред // Радиотехника. 2001. Вып. 121. С.15-18. 11. Токарский П.Л., Панченко Ю.А. КПД решеток магнитных излучателей, расположенных над границей раздела двух сред // Радиотехника. 2006. Вып. 146. С.83-89. 12. Лавров Г.А., Князев А.С. Приземные и подземные антенны. М.: Сов. радио, 1965. 472 с. 13. Марков Г.Т., Чаплин А.Ф. Возбуждение электромагнитных волн. М.-Л.: Энергия, 1967. 376 с. 14. Справочник по антенной технике. Т1 / Под ред. Я.Н.-Фельда и Е.Г. Зелкина. М.: ИПРЖР, 1997. 256 с.

Поступила в редколлегию 11.03.2010

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, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел.: (057) 702-14-30.