

ПИСЬМА В РЕДАКЦИЮ

О поверхностных электромагнитных волнах

В.Н. Дацко, А.А. Копылов

Обсуждается проблема поверхностных электромагнитных волн (ПЭВ). Показано, что в последние годы эксперименты подтверждают существование поверхностных волн Ценнека, однако в теории существуют различные точки зрения по этому поводу.

PACS numbers: 41.20.Jb, 78.68. + m

DOI: 10.3367/UFNr.0178.200801f.0109

Поверхностные электромагнитные волны (ПЭВ) могут возбуждаться на поверхности раздела двух и более сред. Это двумерные электромагнитные волны, которые по третьей координате (высоте) экспоненциально затухают. Они представляют практический интерес, так как их энергия убывает обратно пропорционально расстоянию от точечного источника, в то время как энергия объемной электромагнитной волны (ОВ) убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от источника. Это обстоятельство на практике может существенно увеличить дальность действия радиолокационных станций и систем связи, а также повысить их эффективность за счет того, что волна "привязана" к поверхности и "следует" за ее кривизной.

Многие вопросы, связанные с возбуждением и распространением ПЭВ, до настоящего времени не изучены. Известны объемные (трехмерные) электромагнитные волны, медленные поверхностные волны, быстрые поверхностные волны, среди которых особое место занимают поверхностные электромагнитные волны Ценнека [1]. Теория этих волн была построена Ценнеком и Зоммерфельдом [1, 2]. Многие ученые как у нас, так и за рубежом [3 – 6] публикуют противоречивые сведения о поверхностных волнах Ценнека и даже теоретически "доказывают" невозможность их существования [7]. История исследований волны Ценнека подробно изложена в работе [8]. В настоящее время проблема поверхностных электромагнитных волн выглядит следующим образом.

Поверхностные электромагнитные волны могут существовать на границе раздела двух сред в том случае, если диэлектрическая проницаемость одной из них отрицательна либо имеет ненулевую мнимую часть. В первом случае волны называются волнами Фано и их фазовая скорость меньше скорости света, во втором — волнами Ценнека, фазовая скорость которых превышает скорость света [9]. До 1980 г. экспериментальные работы по поверхностным волнам выполнялись либо на газовой плазме в радио-

диапазоне, либо на полупроводниках и металлах в инфракрасном и оптическом диапазонах. Во всех этих случаях фиксировались моды Фано с фазовой скоростью, заметно меньшей скорости света, что облегчало их наблюдение методом нарушенного полного внутреннего отражения или с помощью дифракционной решетки, нанесенной на поверхность. В отличие от мод Фано фазовая скорость поверхностных волн Ценнека превосходит скорость света, и это делает непригодными упомянутые методы. По этой причине волны Ценнека экспериментально долгое время не наблюдались. Более того, существовало мнение, что их вообще невозможно возбудить. Дело еще и в том, что любой реальный источник электромагнитного поля, расположенный на границе раздела двух сред, возбуждает смешанное поле, состоящее из поверхностной и объемной волн. Разделение этих волн оказывается сложной экспериментальной задачей.

Волна Ценнека экспериментально была обнаружена в 1989 г. [8]. В серии лабораторных экспериментов на соленой воде на СВЧ однозначно (практически в чистом виде) волна Ценнека была отделена от объемного поля излучения и измерены все ее основные характеристики: фазовая скорость и затухание, высота локализации поля в воздухе, скорость изменения фазы волны по вертикали, характерная зависимость убывания поля волны с расстоянием. Все характеристики оказались в хорошем согласии с теорией Зоммерфельда – Ценнека. Отметим также экспериментальную работу [10], в которой волны Ценнека наблюдались на оптических частотах в твердом теле.

Вместе с тем в теории волны Ценнека сложилась необычная ситуация. Оказывается, теоретический утвердительный или отрицательный ответ о возможности существования волны Ценнека в поле реального излучателя **зависит от способа решения задачи.**

В [11] указано, что "...существование волны Ценнека зависит от того, в каком виде мы ищем решение, т.е. при представлении решения в виде интеграла по разрезам на рис. 4.12 она есть, а при решении в виде того же интеграла, но по разрезам на рис. 4.11 ее нет...".

У Зоммерфельда волна есть [2]. Решение было дано им в форме определенного интеграла весьма громоздкого вида. Чтобы этот интеграл вычислить хотя бы приближенно, Зоммерфельд переводил путь интегрирования в комплексную плоскость в пространство волновых векторов. Тогда интеграл распадается на три слагаемых, одно из которых соответствует поверхностной волне Ценнека, два других —

В.Н. Дацко, А.А. Копылов. Московский государственный институт электронной техники,
проезд 4806, д. 5, г. Зеленоград, 124498 Москва,
Российская Федерация
E-mail: kopylov@zelnet.ru, anatoly.kopylov@gmail.com,
contyr@yandex.ru

Статья поступила 5 сентября 2006 г.,
после доработки 13 апреля 2007 г.

объемным волнам, по одной в каждой из сред. В общем случае оценить удельный вес каждого слагаемого довольно трудно. Зоммерфельд считал, что на больших расстояниях преобладает поверхностная волна, и таким образом им установлена связь поверхностной волны с источником излучения. Подход Вейля [3] приводит к решению в виде углового спектра плоских волн, который эквивалентен интегральной формуле Зоммерфельда, но не содержит поверхностную волну.

В дальнейшем традиционный подход к задаче заключался в использовании метода перевала для вычисления интеграла Зоммерфельда. Однако в 1969 г. В.В. Шевченко показал [12], что "...Особым случаем поверхностных волн является волна Ценнека, существующая на плоской проводящей поверхности. Поперечное волновое число этой волны находится в третьем квадранте в области 1, т.е. волна Ценнека является быстрой волной... Интересно отметить, что если ее искать методом перевала из интеграла Зоммерфельда, выражающего поле источника над плоской проводящей поверхностью, то оказывается, что перевальный путь никогда не пересекается полюсом, соответствующим волновому числу волны Ценнека... Таким образом, волна Ценнека не выделяется в качестве вычета из-под интеграла. Этот факт, в частности, был предметом дискуссии двух известных физиков Барлоу и Уэйта. В связи со сказанным выше, Уэйт ставит под сомнение существование на практике волны Ценнека..." [13].

Отметим, что в работе [14] того же В.В. Шевченко возможность существования волны Ценнека обоснована другим методом: нахождением спектра нормальных волн над импедансной поверхностью. Позднее эти результаты были подтверждены Ю.В. Кистовичем [15]. Он же теоретически обосновал [16] корректность постановки задачи и условий проведения эксперимента [8].

В книге [17] отмечено: "...волна Ценнека превращается в плоскую волну, скользящую вдоль идеально проводящей плоскости...", и "...Передающие антенны поверхностной волны Ценнека фактически не возбуждают, и она для распространения радиоволн над сушей или морем реального значения не имеет, поле радиоволн имеет совершенно иную структуру...", и "...Волна Ценнека может быть как быстрой, так и медленной..."

Из изложенного ясно, что мнения теоретиков о возможности существования волны Ценнека разделились. Известно, что в таких случаях решающее слово принадлежит эксперименту. И такой эксперимент был проведен [8]. Казалось бы, в теоретическом споре поставлена точка. Однако в журнале *УФН* [7] А.В. Кукушкин в своей статье опять утверждает: "...Заметим, кстати, что предсказанная в свое время ... так называемая волна Ценнека (быстрая собственная волна) так и не обнаружена до сих пор...". Однако волну Ценнека наблюдал и В.А. Егоров [18].

Вывод: необходимо продолжить теоретические и экспериментальные исследования поверхностных электромагнитных волн, в том числе и поверхностных электромагнитных волн Ценнека.

Экспериментальные исследования [8] проводились в сантиметровом диапазоне волн, но для полноты картины нужно существенно расширить частотный диапазон исследований и особое внимание обратить на исследования в метровом диапазоне.

Необходимо определить условия возбуждения и распространения поверхностных волн в естественных условиях, что имеет большое прикладное значение и позволит создавать более эффективные преобразователи электромагнитных волн в поверхностные (антенные устройства [19, 20] и др.), радиолокационные станции [21, 22] и системы связи [23] на поверхностных волнах. Кроме того, могут быть созданы линии передачи [24] (естественные и искусственные) поверхностных волн, более эффективные, чем существующие в настоящее время.

Список литературы

1. Zenneck J *Ann. Phys. (Leipzig)* **23** 846 (1907)
2. Sommerfeld A *Ann. Phys. (Leipzig)* **28** 665 (1909)
3. Weyl H *Ann. Phys. (Leipzig)* **60** 481 (1919)
4. Fock V *Ann. Phys. (Leipzig)* **17** 401 (1933)
5. Van der Pol B *Physica* **2** 843 (1935)
6. *Новейшие исследования распространения радиоволн вдоль земной поверхности* Сб. статей (Под ред. Л. И. Мандельштама, Н. Д. Папалекси) (М.-Л.: Гостехиздат, 1945)
7. Кукушкин А В *УФН* **163** (2) 81 (1993) [*Kukushkin A V Phys. Usp.* **36** 81 (1993)]
8. Байбаков В И, Дацко В Н, Кистович Ю В *УФН* **157** 722 (1989) [*Baibakov V I, Datsko V N, Kistovich Yu V Sov. Phys. Usp.* **32** 378 (1989)]
9. Agranovich V M, Mills D L *Surface Polaritons: Electromagnetic Waves at Surfaces and Interfaces* (Amsterdam: North-Holland, 1982) [*Поверхностные поляритоны. Электромагнитные волны на поверхностях и границах раздела сред* (Под ред. В. М. Аграновича, Д. Л. Миллса) (М.: Наука, 1985) с. 72]
10. Zhizhin G N et al. *Solid State Commun.* **51** 613 (1984)
11. Марков Г Т, Чаплин А Ф *Возбуждение электромагнитных волн* 2-е изд. (М.: Радио и связь, 1983) с. 106
12. Шевченко В В *Радиотехника и электроника* **14** 1768 (1969)
13. Barlow H M, Cullen A L *Proc. IEE* **100** 329 (1953)
14. Шевченко В В *Плавные переходы в открытых волноводах: Введение в теорию* (М.: Наука, 1969) [Translated into English: *Shevchenko V V Continuous Transitions in Open Waveguides; Introduction to the Theory* (Boulder, Colo.: Golem Press, 1971)]
15. Кистович Ю В, Дисс. ... канд. физ.-мат. наук (М.: МФТИ, 1988)
16. Кистович Ю В *ЖТФ* **59** (4) 16 (1989)
17. Вайнштейн Л А *Электромагнитные волны* 2-е изд. (М.: Радио и связь, 1988) с. 219
18. Егоров В А "Особенности распространения радиоволн вдоль залесенных трасс", в сб. *Региональная X конф. по распространению радиоволн, Санкт-Петербург, 2004* (СПб., 2004) с. 95
19. Дацко В Н, Копылов А А, "Зеркальная антенна поверхностных волн", Патент РФ № 46612 (2005)
20. Дацко В Н, Копылов А А "Зеркальная антенна поверхностных волн", Патент РФ № 61468 по заявке № 2006138172 от 27.10.2006
21. Дацко В Н, Копылов А А "Радиолокационная станция на поверхностных волнах", Патент РФ № 48076 (2005)
22. Дацко В Н, Копылов А А "Радиолокационная станция на поверхностных волнах", Патент РФ № 48075 (2005)
23. Дацко В Н, Копылов А А "Система связи на поверхностной волне", Патент РФ № 75375 по заявке № 2006122489 от 23.06.2006
24. Дацко В Н, Копылов А А "Линия передачи поверхностных волн", Патент РФ № 62294 по заявке № 2006140625 от 16.11.2006

On electromagnetic surface waves

V.N. Datsko, A.A. Kopylov

Moscow Institute of Electronic Technology,
proezd 4806, d. 5, 124498 Zelenograd Moscow, Russian Federation
E-mail: kopylov@zelnet.ru, anatoly.kopylov@gmail.com, contyr@yandex.ru

The problem of electromagnetic surface waves is discussed. In spite of recent experimental evidence for the existence of Zenneck surface waves, theoretical consensus on this issue is lacking.

PACS numbers: 41.20.Jb, **78.68.+m**

Bibliography — 24 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **178** (1) 109 – 110 (2008)

DOI: 10.3367/UFNr.0178.200801f.0109

Received 5 September 2006, revised 13 April 2007

Physics – Uspekhi **51** (1) (2008)