

МЕХАНИЗМ ВОЗДЕЙСТВИЯ МОДУЛИРОВАННОГО ВЫСОКОЧАСТОТНОГО СИГНАЛА НА НЕИДЕАЛЬНЫЙ ДИЭЛЕКТРИК. РАДИОЗВУК

В.К. Баранов, Д.А. Кыдырбаева, Д.К. Тамбовцев

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

Работа относится к области электромагнитной совместимости. Анализируется микроволновый звуковой эффект как наблюдаемое явление преобразования высокочастотного радиосигнала в акустические колебания. Это явление называется радиозвуковым эффектом. Этот сенсорно-акустический эффект представляет собой физическое явление, связанное с преобразованием электромагнитной энергии в низкочастотные механические колебания на пути к рецепторному аппарату путем костной звукопроводимости. В работе рассматриваются физические механизмы взаимодействий амплитудно-модулированного высокочастотного электрического сигнала с неидеальным диэлектриком, приводящие к трансформации в низкочастотные механические или акустические колебания с гармониками модулированного сигнала. В статье представлены исследования возможных эффектов прямого воздействия высокочастотного поля в лечебной практике или физиотерапии. Рассматриваются и анализируются механизмы взаимодействия модулированного высокочастотного сигнала со слабо поглощающим веществом с целью обнаружения электроакустического эффекта. В работе подтверждается наличие исследуемого эффекта нелинейно-инерционного преобразования модулированного высокочастотного сигнала в низкочастотный звук.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, радиоимпульс, радиозвук, электроакустическое преобразование, амплитудная модуляция, физиологическое воздействие, слуховое восприятие.

На сегодняшний день все еще нет однозначного физического обоснования микроволновому слуховому феномену. В 1956 г. было замечено, что люди, случайно оказавшиеся в зоне действия радиолокатора, ощущали звуковые галлюцинации, даже если уши были защищены подавляющими шум фильтрами [1]. Испытуемые поочередно находились за экраном с отверстием диаметром в четверть длины волны на расстоянии 1,5...2,0 м от рупора антенны. Передатчик мощностью 500 КВт работал на частоте 1,3 ГГц, длительность импульса 2 мкс и частота следования 600 Гц (мощность приводится для радиоимпульса). Опрос показал, что звуки ощущаются на гармониках, а основная частота отсутствует. Результаты систематических наблюдений и первых исследований были опубликованы в 1961 г. Аланом Фреем [2], и микроволновый слуховой феномен назвали радиозвуковым эффектом Фрея.

Исследования, проводимые на добровольцах, привели к естественным трудностям при определении количественных и объективных оценок. Оказалось, что при воздействии на человека сверхвысокочастотным радиоизлучением с амплитудно-импульсной манипуляцией относительно большой интенсивности (на 6 м от антенны радиолокаторов с частотами 1,31 и 2,982 ГГц) возникали воспринимаемые звуки непосредственно внутри черепа, которые ощущались как бы от источника звука, расположенного за тыльной частью головы. Был определен порог чувствительности: 80 мВт/см^2 , что соответствует (при геометрическом сечении головы около 250 см^2) поглощаемой мощности до 20 Вт – это большая мощность поглощаемого излучения для головы даже за короткое время действия радиоимпульса.

Для сравнения можно оценить сверхвысокочастотное воздействие на голову прижатого к уху мобильного телефона МТ со сферической диаграммой направленности и с мощностью излучения 0,5 Вт (рис. 1). Итак, направление поглощения – полусфера, поглощаемая мощность до 50 % от мощности излучения, эффективное поглощение происходит внутри головы.

Следовательно, получаем оценочное значение плотности мощности: $0,5(0,5 \text{ Вт} / 250 \text{ см}^2) = 1 \text{ мВт/см}^2$. Эффект радиозвук естественно здесь отсутствует, так как порог чувствительности (см. выше) – 80 мВт/см^2 . Это на порядки превышает санитарно-гигиенические нормы для начала гигагерцового диапазона, представленные в таблице [3]. В целом, биологическая система, выступающая в качестве акцептора, активнее откликается не на стационарные значения, а на их изменения и скорости изменения. Импульсная манипуляция действует эффективнее одночастотной амплитудной модуляции [4].

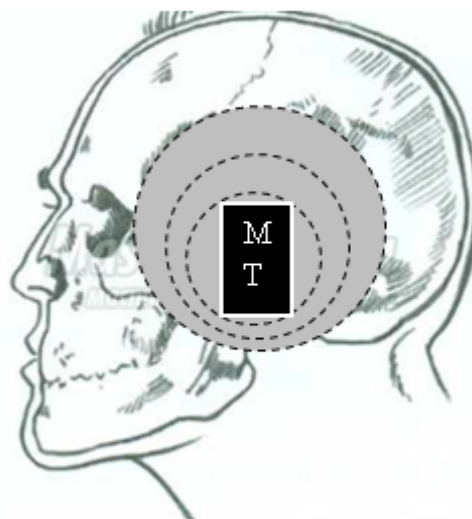


Рис. 1. Голова с геометрическим сечением 250 см^2 .
МТ – излучающий мобильный телефон

Предельно-допустимые значения энергетической экспозиции за рабочий день (8-часовая смена)

Диапазон частот, ГГц	Уровень интенсивности и экспозиция ППЭ, мВт/см ²	Примечание
0,3–300 ГГц	$25 \text{ мкВт/см}^2 \times 8 \text{ ч}$	Интенсивность ЭМИ РЧ оценивается значениями плотности потока энергии – ППЭ: Вт/м^2 , мкВт/см^2

Аланом Фреем была предложена гипотеза, что на участках внутреннего уха происходит взаимодействие излучения с термоупругими тканями, сопровождающееся, возможно, их периодической деформацией. В ходе этого процесса при амплитудно-импульсной манипуляции возникают как бы механические ударные волны, воспринимаемые человеком в виде внутреннего звука, который никак не связан с колебанием барабанной перепонки. Этот сенсорно-акустический эффект представляет собой физическое явление, связанное с преобразованием электромагнитной энергии в низкочастотные механические колебания на пути к рецепторному аппарату путем костной звукопроводимости. Также было обнаружено, что при соответствующем выборе амплитудно-модулированного сигнала существует возможность передавать человеку информацию в виде отдельных слов, фраз и других звуков. Громкость воспринимаемого звука можно увеличить, но акустическую травму нанести невозможно, поскольку барабанная перепонка в процессе не участвует [2]. Формирование же спектра, воспринимаемого человеком в виде слухового ощущения, определяется взаимодействием анатомических структур, представляющих как бы систему акустических резонаторов с динамической связью, выше критической [4].

В ранних работах и более поздних публикациях, посвященных исследованию эффекта радиозвук (см., например, [5]), присутствует, как правило, направленность на физиологическую трактовку этого явления, связанного с особенностями либо слуховой системы, либо с непосредственным влиянием модулированного СВЧ электромагнитного поля на структуры мозга. Прямые физические измерения с размещением сенсорных элементов радиоэлектроники провести было невозможно. Опыты же на животных с вживлением электродов не дали сопоставимых результатов ввиду отсутствия адекватной реакции испытуемых животных на радиозвук [4]. Кроме того, зондирующие электроды сами находились под воздействием электромагнитного излучения, что сопровождалось, скорей всего, детектированием и гальваническим эффектом.

Авторов настоящей работы интересует непосредственный механизм преобразования модулированного высокочастотного сигнала в низкочастотный звук, без привязки к физиологическим особенностям человека; объективное исследование электроакустического преобразования, в противоположность субъективно наблюдаемому на добровольцах радиозвуковому эффекту. Более того, в радиозвуковом эффекте, скорей всего, возбуждение акустических колебаний происходит в

направлении, перпендикулярном распространению электромагнитной волны, а в электроакустическом эффекте звук должен распространяться по направлению действия электрического поля. Поэтому можно считать, что предлагаемые авторами исследования оригинальны в постановочной части. Исследования также должны гарантировать объективность и надёжность получаемых результатов. Рассмотрение в данной работе именно амплитудно-модулированного сигнала объясняется тем, что обнаружение звука возможно провести достаточно простыми средствами, например, с помощью пьеза датчика или же динамического микрофона. При амплитудной модуляции получается простой сигнал, удобный для частотного анализа и дальнейшего полномасштабного спектрального исследования. Конечно, также не исключаются исследования и при амплитудно-импульсной модуляции, и при амплитудной манипуляции.

В настоящей публикации представлены исследования возможных эффектов прямого воздействия высокочастотного поля в лечебной практике или физиотерапии [6, 7]. Рассматриваются и анализируются механизмы взаимодействия модулированного высокочастотного сигнала со слабо поглощающим веществом с целью обнаружения электроакустического эффекта. Слабая проводимость необходима, чтобы электродинамическое взаимодействие происходило не на границе раздела, а в значительном объёме, что определяется величиной скин-слоя. Возможно, что периодическая деформация сопровождающаяся либо расширением, если происходит разогрев вещества, или сжатием, если происходит диэлектрическая поляризация. Для понимания механизма трансформации модулированного высокочастотного сигнала в звук необходимо представить его спектральные изменения, сопровождающиеся акустическими эффектами. В дальнейшей исследовательской работе разрабатывается лабораторный макет, который позволит выполнить критерильные эксперименты, и, конечно, обсудить их результаты.

В работах Р.Э. Тиграняна и В.В. Шорохова [4, 8], взятых за прототип, представлены методики, разработаны макеты и устройства для проведения модельных физических экспериментов с использованием резонансно-акустических полостей в виде стеклянных пробирок и сфер (стеклянные колбы, покрытые сантиметровым слоем пористой резины). Резонансно-акустические полости заполнялись жидкостью: гелем, этиловым спиртом или этанолом... Эти полости находились под воздействием излучения импульсных передатчиков значительной мощности в импульсе: 72 Вт на частоте 800 МГц и 560 Вт на частоте 2,375 ГГц. Частота следования радиоимпульсов находилась в звуковом диапазоне, а их длительность изменялась от 3 мкс до 10 мс. Акустические колебания фиксировались с помощью пьеза датчика из Титанита Бария – диск диаметром 2 см и толщиной 0,5 мм. В эксперименте линейчатые спектры возбуждаемых акустических сигналов соответствовали гармоническим откликам на основную частоту следования радиоимпульсов и попадающим на частоты резонатора, но первой гармоники по этой причине в спектре может и не быть. В качестве примера на рис. 2 приведены линейчатые спектры гармоник, полученных в сферическом резонаторе. Использовался импульсный генератор на частоте 2375 МГц с мощностью в импульсе 500 Вт. Резонатор располагался в торце открытого волновода, сечение которого 100×72 мм.

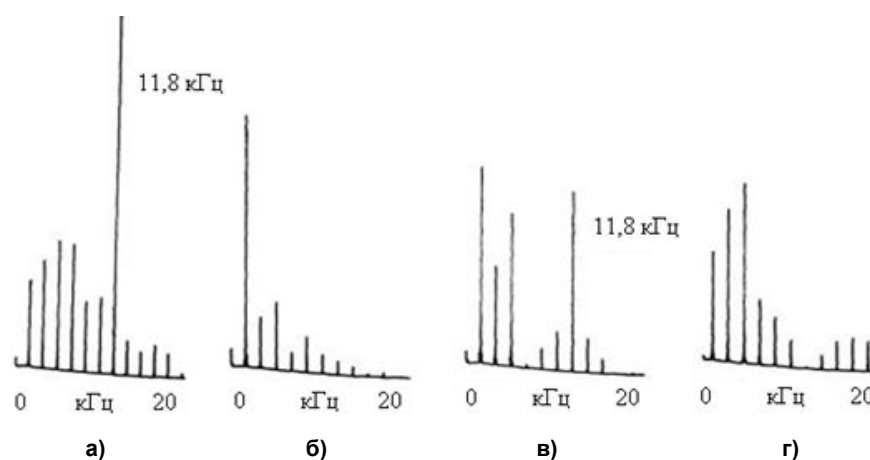


Рис. 2. Спектр звука для сферы, заполненной этанолом. Частота следования радиоимпульсов 1,7 кГц, их длительность: а – 40 мкс, б – 80 мкс, в – 120 мкс, г – 160 мкс. Выделена седьмая гармоника [4]

К слабо поглощающим средам могут быть отнесены многие вещества, находящиеся в состояниях, когда проводящие свойства среды соотносятся с диэлектрическими. Аналитически это определяется соотношением между величинами действительной и мнимой компонентами комплексной диэлектрической проницаемости. Это же можно сказать и о комплексной проводимости. Для большинства веществ данное состояние достигается лишь в некоторой частотной области, в силу зависимости диэлектрической проницаемости и проводимости от частоты электромагнитной волны. Отметим, что слабо проводящие среды, включая почву, воду, в том числе, и физиологический раствор [9], обладают нелинейными вольтамперными характеристиками, что позволяет нам предположить наличие части спектра выходного сигнала в области низких частот. Это обеспечивает так называемую кросс-демодуляцию сигнала [10]. Существенной нелинейностью также обладает граница раздела сред, что здесь не обсуждаем. В предлагаемом ниже критериальном эксперименте применяется амплитудно-модулированный сигнал – АМ. Использование АМ-сигнала предполагает простоту анализа и однозначность получаемого результата.

АМ-сигнал может быть представлен в виде:

$$E_c(t) = A \cos(\omega_c t) + \frac{1}{2} Am \cos(\omega_c - \omega_s)t + \frac{1}{2} Am \cos(\omega_c + \omega_s)t, \quad (1)$$

где m – глубина модуляции; ω_c – частота ВЧ-сигнала; ω_s – частота НЧ-сигнала.

Из выражения (1) очевидно наличие в сигнале трёх частотных составляющих. В общем случае предположим, что ВАХ среды представима нелинейной функцией $I = f(U)$, которая аппроксимируется в некоторой окрестности точки U_0 полиномом Тейлора:

$$I = f(U_0) + a_1(U - U_0) + a_2(U - U_0)^2 + \dots + a_n(U - U_0)^n. \quad (2)$$

В конечном счёте, можно говорить о наличии в спектре сигнала набора гармоник, определяемых соотношением комбинаторики:

$$\begin{cases} n\omega_1 + k\omega_2 \\ |k\omega_2 - n\omega_1| \end{cases}, \text{ где } (k, n) \in Z. \quad (3)$$

Исходя из спектра амплитудно-модулированного сигнала (1), получаем, что самая низкочастотная составляющая сигнала определяется, как $|k(\omega_c - \omega_s) - n\omega_c|$ при $k = n = 1$ – это одна из боковых полос непосредственно связана с модулирующим сигналом.

Можно отметить, что в комбинационном спектре (3) выделяются именно низкочастотные сигналы, связанные с частотой модулирующего сигнала ω_s . В среде могут также возникнуть и токи или проводимости, или смещения на этой частоте и её первых гармониках. Совершенно очевидно, что спектры акустических колебаний на рис. 1, и наблюдаемые на других акустических моделях [3, 7], также подчиняются закону комбинаторики (3). Соотношение комбинаторики, рассмотренное здесь, не учитывает инерционных эффектов, которые в большей степени зависят от частоты несущего высокочастотного сигнала, и проявляются, например, в сегнетоэлектриках при приближении к гигагерцовому диапазону.

В эксперименте использовался лабораторный генератор GRG–450В на частоте 450 МГц с амплитудной модуляцией на частоте 2 КГц. Модулирующий сигнал создавался на генераторе ГЗ–112. Наблюдалось звучание с частотой 6 кГц на сегнетоэлектрическом преобразователя ТГМ–25Е (габариты: $d = 17$ мм, $h = 2$ мм).

Итак, в работе подтверждается наличие исследуемого эффекта нелинейно-инерционного преобразования модулированного ВЧ сигнала в НЧ звук. Звучание на третьей гармоники связано, скорее всего, с частотной характеристикой преобразователя, что, однако, требует дополнительных исследований.

Литература

1. Airborne Instruments Laboratory. An Observation on the Detection by the Ear of Microwave Signals // Pros. IRE. – 1956. – Vol. 44, no. 10. – P. 2A.
2. Frey Allan. Auditory system response to radio frequency energy // Aerospace Med. – 1961. – 32. – P. 1140–1142.
3. Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона. Санитарные правила и нормы. СанПин 2.2.4/2.1.8.055-96 (утв. постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ 08.05.96 № 9).

4. Тигранян, Р.Э. Физические основы слухового эффекта СВЧ / Р.Э. Тигранян, В.В. Шорохов. – Пуццино: ОНТИ Пуццинского научного центра АН СССР, 1990. – 131 с.
5. Elder, J.A. Auditory response to pulsed radiofrequency energy / J.A. Elder, C.K. Chou // *Bioelectromagnetics*. – 2003. – 24. – S162–S173. DOI: 10.1002/bem.10163
6. Баринов, А.Е. Коагуляция частиц крови под воздействием СВЧ излучения / А.Е. Баринов, В.И. Тамбовцев, Д.А. Кыдырбаева // *Материалы XIII Международной конференции «Физика и технические приложения волновых процессов»*. Казань – Самара. – 2015. – С. 353–355.
7. Даровских, С.Н. Уменьшение порога когезии в СВЧ-поле для взвеси бактерий в физиологическом растворе на примере стафилококков / С.Н. Даровских, В.И. Тамбовцев, Ю.С. Шишкова // *Материалы XII Международной конференции «Физика и технические приложения волновых процессов»*. Самара – Нижний Новгород. – 2014. – С. 221–222.
8. Тигранян, Р.Э. К вопросу о физическом моделировании акустических эффектов при действии СВЧ полей на биологические системы / Р.Э. Тигранян, В.В. Шорохов // *Биофизика*. – 1985. – Т. 30, вып. 5. – С. 391–399.
9. Баринов, А.Е. Трасс-демодуляция амплитудно-модулированного сигнала в слабо поглощающей среде / А.Е. Баринов, И.И. Прокопов, И.Л. Железняк // *Материалы XIII Международной конференции «Физика и технические приложения волновых процессов»*. Казань – Самара. – 2015. – С. 103–105.
10. Баринов, А.Е. О воздействии СВЧ излучения малой мощности на физиологический раствор / А.Е. Баринов, Н.В. Вдовина, И.И. Прокопов // *Материалы XII Международной конференции «Физика и технические приложения волновых процессов»*. Нижний Новгород – Самара. – 2014. – С. 217–219.

Баранов Виктор Константинович, канд. техн. наук, доцент кафедры инфокоммуникационных технологий, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; baranobvvk@susu.ac.ru.

Кыдырбаева Дария Асхатовна, аспирант специальности «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; ekibost@mail.ru.

Тамбовцев Денис Константинович, магистрант специальности «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; foreseen@mail.ru.

Поступила в редакцию 10 февраля 2016 г.

DOI: 10.14529/ctcr160207

THE EXPOSURE MECHANISM OF HIGH-FREQUENCY MODULATED SIGNAL ON UNIDEAL NON-CONDUCTOR. RADIOHEARING

V.K. Baranov, baranobvvk@susu.ac.ru,

D.A. Kydyrbaeva, ekibost@mail.ru,

D.K. Tambovtsev, foreseen@mail.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The article is related to the electromagnetic compatibility. Microwave auditory effect was analyzed as the observed phenomenon of high-frequency radio signals transformation into acoustic oscillations. This phenomenon was called a radio hearing effect. This sensory-acoustic effect is a natural phenomenon associated with the conversion of electromagnetic energy in the low-frequency mechanical vibrations on the way to the receptor system by bone conduction. The physical

interaction mechanisms of amplitude-modulated high-frequency electrical signal with a perfect non-conductor were considered, leading to a transformation in the low frequency mechanical vibrations or acoustic harmonics of the modulated signal. In the paper studies of the possible effects of direct exposure to high-frequency field in medical practice, or physical therapy are presented. The mechanisms of interaction of the modulated RF signal with a weakly absorbing material with goal to detect electro-acoustic effect were presented. The presence of inertial nonlinear conversion effect of a modulated RF signal into low frequency sound is confirmed.

Keywords: electromagnetic compatibility, radio pulse, radiosound, electroacoustic conversion, amplitude modulation, physiological interaction, auditory perception.

References

1. Airborne Instruments Laboratory. An Observation on the Detection by the Ear of Microwave Signals. *Pros. IRE*, 1956, vol. 44, no. 10, p. 2A.
2. Frey Allan. Auditory System Response to Radio Frequency Energy. *Aerospace Med*, 1961, 32, pp. 1140–1142.
3. *Elektromagnitnye izlucheniya radiochastotnogo diapazona. Sanitarnye pravila i normy* [Radio-frequency Electromagnetic Radiation (RF EMR) under Occupational and Living Conditions]. Sanitary Regulations and Norms 2.2.4/2.1.8.055-96 (Appr. as the Resolution of the State Committee of Sanitary and Epidemiological Surveillance of RF 08.05.96 № 9). 18 p.
4. Tigranyan R.E., Shorokhov V.V. *Fizicheskie osnovy slukhovogo efekta SVCh* [Physical Basis of the Microwave Auditory Effect]. Department of Scientific and Technical Information of Pushchinsky Scientific Center of Academy of Sciences of the USSR, 1990. 131 p.
5. Elder J.A., Chou C.K. Auditory Response to Pulsed Radiofrequency Energy. *Bioelectromagnetics*, 2003, 24, pp. 162–173. DOI: 10.1002/bem.10163
6. Barinov A.E., Tambovtsev V.I., Kydyrbaeva D.A. [Coagulation of Blood Cells on Microwave Exposure]. *Fizika i tekhnicheskie prilozheniya volnovykh protsessov. Materialy XIII Mezhdunarodnoi konferentsii* [Physics and Technology of Wave Processes: Proceedings of the XIII International Conference]. Kazan' – Samara, 2015, pp. 353–355. (in Russ.)
7. Darovskikh S.N., Tambovtsev V.I. Shishkova Yu.S. [Lowering the Threshold Cohesion in the Microwave Field for Bacteria Suspended in Physiological Saline for Example Staphylococci]. *Fizika i tekhnicheskie prilozheniya volnovykh protsessov. Materialy XII Mezhdunarodnoi konferentsii* [Physics and Technology of Wave Processes: Proceedings of the XII International Conference]. Samara – Nizhnii Novgorod, 2014, pp. 221–222. (in Russ.)
8. Tigranyan R.E., Shorokhov V.V. [On the Question of Physical Modeling of Acoustic Effects of the Action of Microwave Fields on Biological Systems]. *Biophysics*, 1985, vol. 30, no. 5, pp. 391–399. (in Russ.)
9. Barinov A.E., Prokopov I.I., Zheleznyak I.L. [Trass-Demodulation of an Amplitude Modulated Microwave Signal in a Weakly Absorbing Medium]. *Fizika i tekhnicheskie prilozheniya volnovykh protsessov: Materialy XIII Mezhdunarodnoi konferentsii* [Physics and Technology of Wave Processes: Proceedings of the XIII International Conference]. Kazan' – Samara, 2015, pp. 103–105. (in Russ.)
10. Barinov A.E., Vdovina N.V., Prokopov I.I. [About the Impact of Microwave Radiation at Low Power Saline]. *Fizika i tekhnicheskie prilozheniya volnovykh protsessov: Materialy XII Mezhdunarodnoi konferentsii* [Physics and Technology of Wave Processes: Proceedings of the XII International Conference] Samara – Nizhnii Novgorod, 2011, pp. 217–219. (in Russ.)

Received 10 February 2016

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Баранов, В.К. Механизм воздействия модулированного высокочастотного сигнала на неидеальный диэлектрик. Радиозвук / В.К. Баранов, Д.А. Кыдырбаева, Д.К. Тамбовцев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2016. – Т. 16, № 2. – С. 68–73. DOI: 10.14529/ctcr160207

FOR CITATION

Baranov V.K., Kydyrbaeva D.A., Tambovtsev D.K. The Exposure Mechanism of High-Frequency Modulated Signal on Unideal Non-Conductor. *Radiohearing. Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2016, vol. 16, no. 2, pp. 68–73. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr160207