

УДК 612.014.421.5

О ВОЗМОЖНОСТИ ЛОКАЛЬНОГО НАГРЕВА ВНУТРЕННИХ УЧАСТКОВ ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА СЕРИЕЙ РАДИОИМПУЛЬСОВ

В. Д. Сахацкий, В. Ф. Павлов

Показано, что если тело человека облучать серией, например, из двух периодически следующих радиоимпульсов с различными несущими частотами, то на определенной глубине вторичный радиоимпульс с более высокой несущей частотой «догоняет» первичный, обеспечивая таким образом возможность локального нагрева за счет суммирования энергий радиоимпульсов.

Вопросы локального нагрева внутренних участков тела человека, представляющие практический интерес в области медицины, изучались рядом авторов, и результаты исследований проанализированы в работе [1].

В данной работе отмечается, что фокусировка электромагнитного поля с помощью непоглощающих линз или других способов не дает ожидаемого эффекта в сильнопоглощающей среде, какой, в частности, является тело человека. В лучшем случае поле, экспоненциально затухая, в основном осуществляет нагрев поверхностного слоя тканей в цилиндре с основанием, равным размеру линзы D , и высотой, равной глубине проникновения электромагнитной волны l_0 . Следует, однако, отметить, что этот вывод справедлив при одночастотном режиме облучения.

В этой связи представляет интерес поиск других способов достижения локального нагрева внутренних частей тела человека.

Физические предпосылки одного из таких способов заключаются в следующем.

Тело человека представляет собой среду со значительными потерями. Как известно, такие среды обладают аномальной дисперсией, при которой фазовая и групповая скорости распространения сигнала растут с увеличением частоты.

Если тело человека облучать радиоимпульсами с различными несущими частотами и с определенной друг относительно друга задержкой во времени, то благодаря дисперсии и, следовательно, разной скорости распространения радиоимпульсов в теле человека вторичный радиоимпульс, имея более высокую несущую частоту, может «догнать» первичный радиоимпульс. В результате в месте «встречи» радиоимпульсов образуется локальный нагрев тканей за счет суммарной энергии радиоимпульсов.

Теоретическое обоснование такой предпосылки наиболее просто можно продемонстрировать на упрощенной модели тела человека, представляющей собой полубесконечный слой [2].

При распространении в такой среде радиоимпульса его групповая скорость определяется выражением [3]

$$V_g = 1/\operatorname{Re} h'(\omega_0), \quad (1)$$

где h — комплексная постоянная распространения, ω_0 — круговая частота несущей, штрих означает производную.

Согласно [2] для низких частот, когда выполняется условие

$$\sigma/\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r \geq 25, .$$

где σ — проводимость среды, ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость свободного пространства, ϵ_r — относительная диэлектрическая проницаемость среды, реальная часть постоянной распространения может быть представлена в виде

$$\beta = \sqrt{\omega\mu_0\sigma/2},$$

где μ_0 — магнитная проницаемость свободного пространства.

Отсюда согласно (1) групповая скорость радиоимпульса для низких частот равна

$$V_{гнч} = \sqrt{8\omega_0/\mu_0\sigma}.$$

В области высоких частот, когда выполняется условие

$$\omega > 5\sigma/\epsilon_0\epsilon_r,$$

реальная часть постоянной распространения имеет вид

$$\beta = \omega\sqrt{\epsilon_r\epsilon_0\mu_0}.$$

Следовательно, групповая скорость радиоимпульса в области высоких частот равна

$$V_{гвч} = 1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0\epsilon_r}.$$

Так как

$$V_{гвч}/V_{гнч} = \sqrt{\sigma/8\omega\epsilon_0\epsilon_r} > 1,$$

то через определенное время вторичный радиоимпульс «догонит» первичный, накладываясь на последний.

Покажем это на примере падения на выбранную модель тела человека периодической серии радиоимпульсов, огибающая которых имеет прямоугольную форму.

Напряженность электрического поля падающих на тело человека радиоимпульсов единичной амплитуды длительностью τ_n и периодом следования T на расстоянии z от поверхности тела может быть представлена в виде [4]

$$E = \operatorname{Re} \exp(j\omega_0 t) \sum_{k=-N}^{+N} |\Pi| A_k \exp[j(k\omega_n t + \varphi)], \quad N \rightarrow \infty, \quad (2)$$

где ω_0 — круговая частота несущей, $A_k = (1/\pi k) \sin\left(\frac{\tau_n}{T} k\pi\right)$, $k \neq 0$,

$A_0 = \tau_n/T$, $\omega_n = 2\pi/T$ — круговая частота следования импульсов, $|\Pi|$ и φ — соответственно модуль и фаза коэффициента передачи гармонического излучения частотой $\omega = \omega_0 + k\omega_n$ на расстоянии z .

Для рассматриваемой структуры коэффициент передачи определяется по формуле, приведенной в [2]:

$$\Pi = 2\beta_0/(\beta_0 + k_1),$$

где $\beta_0 = 2\pi/\lambda$ (λ — длина волны в свободном пространстве, соответствующая частоте ω), k_1 — волновое число в поглощающей среде. Последнее определяется следующим образом [2]:

$$k_1 = \beta_0 \sqrt{\epsilon_r} \sqrt{1 + j\sigma/\omega\epsilon_0\epsilon_r}.$$

Анализ полученных уравнений проведен численным методом на примере периодической серии радиоимпульсов с длительностью импульса $\tau_n = 5T_0$ и периодом следования $T = 40T_0$.

Период несущих колебаний T_0 определялся несущей частотой f_0 ;

$$T_0 = 1/f_0.$$

Несущие частоты первичного и вторичного радиоимпульсов соответственно были равны

$$f_0 = 100 \text{ МГц} \quad \text{и} \quad f_0 = 3000 \text{ МГц.}$$

Постоянство относительных параметров периодической серии низкочастотных и высокочастотных радиоимпульсов обеспечивало одинаковую точность результатов счета. Картину наложения высокочастотного импульса на низкочастотный можно проследить на примере двух следующих друг за другом радиоимпульсов, что можно реализовать выбором соответствующего начала отсчета времени

Приведенные ниже результаты расчета соответствуют нулевому времени задержки между первичным и вторичным радиоимпульсами.

Электрофизические характеристики полубесконечного слоя соответствовали параметрам мышечной ткани человека [2]. В частности, для радиоимпульса с несущей частотой $f_0 = 100 \text{ МГц}$

$$\epsilon_r = 73, \quad \sigma = 0,87 \text{ См/м},$$

а для радиоимпульса с несущей частотой $f_0 = 3000 \text{ МГц}$ —

$$\epsilon_r = 47, \quad \sigma = 2,22 \text{ См/м}.$$

Пространственное положение заднего и переднего фронтов первичного и вторичного радиоимпульсов в различные моменты времени t/T_0 показаны, соответственно, на рис. 1 и 2. При этом время отсчитывалось в единицах периода несущих колебаний (T_0) первичного радиоимпульса.

Численный анализ показал, что при вычислении амплитуды радиоимпульса с точностью до двух десятичных знаков бесконечный в строгом смысле ряд (2) может быть ограничен величиной $N = 500$.

На приведенных рисунках кривые 1 соответствуют положению фронтов импульсов в момент времени $t/T_0 = 2,7$, 2 — $t/T_0 = 2,75$ и 3 — $t/T_0 = 2,81$.

Как видно из рисунков, действительно происходит наложение вторичного импульса на первичный и величина перекрытия импульсов растет по мере их распространения в глубь поглощающей среды.

Рассмотренный пример соответствует случаю, когда амплитуды первичного и вторичного импульсов равны между собой. Поэтому, как и следовало ожидать, на одной и той же глубине амплитуда высокочастотного импульса, вследствие более сильного затухания волны, имеет меньшую величину по сравнению с низкочастотным импульсом. Следовательно, чтобы получить заметный эффект от суммарной энергии радиоимпульсов, амплитуда вторичного импульса должна быть выше амплитуды первичного импульса.

Более строгая модель тела человека обычно представляется в виде плоской многослойной структуры [2]. При этом электрофизические параметры первого слоя (относительная проницаемость ϵ_r и удельная проводимость σ) соответствуют параметрам кожи, второго слоя — электрофизическим параметрам жирового слоя и третьего полубесконечного слоя — электрофизическим параметрам мышечной ткани.

Для рассматриваемой структуры коэффициент передачи определяется по формуле [2]

$$\Pi(z, \omega) = C_1' e^{jk_1 z} + C_1'' e^{-jk_1 z}, \quad 0 \leq z \leq a,$$

$$\Pi(z, \omega) = C_2' e^{jk_2 z} + C_2'' e^{-jk_2 z}, \quad a \leq z \leq a+b=c, \quad (3)$$

$$\Pi(z, \omega) = C_3 e^{jk_3(z-c)}, \quad c \leq z < \infty,$$

где

$$k_i = \beta_0 \sqrt{\epsilon_{ri} + j 60 \sigma_i \lambda}, \quad i=1, 2, 3,$$

$$C_1' = D^{-1} f_{1t} (1 + f_{2r} f_{3r} e^{j2k_2 b}),$$

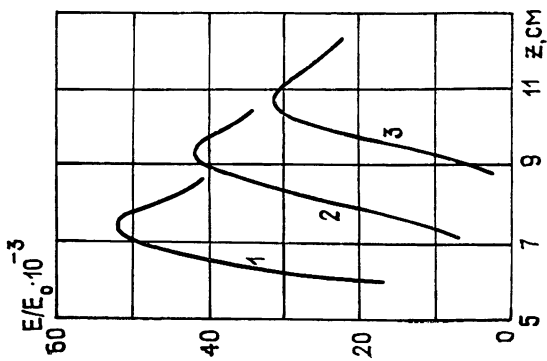


Рис. 1.

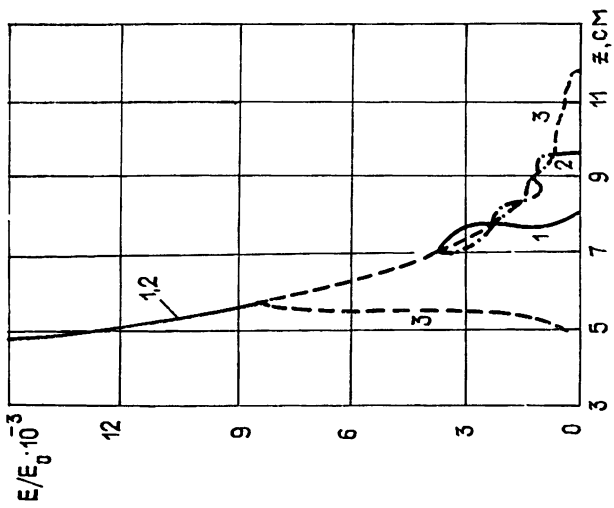


Рис. 2.

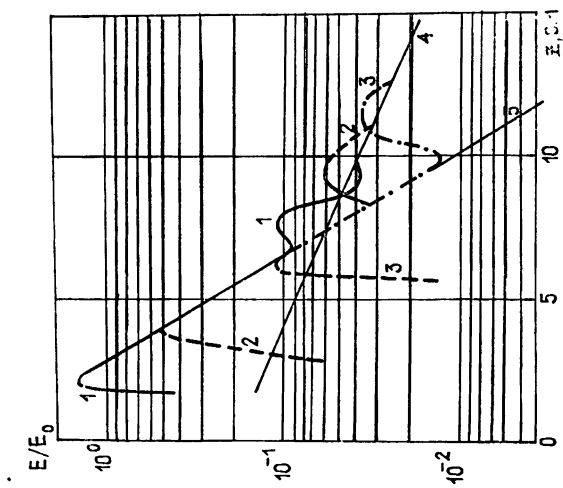


Рис. 3.

$$C_1'' = D^{-1} f_{1t} (f_{2r} + f_{3r} e^{2i_2 b}) e^{j2k_1 a},$$

$$C_2' = D^{-1} f_{1t} f_{2t} e^{j(k_1 - k_2) a},$$

$$C_2'' = D^{-1} f_{1t} f_{2t} f_{3r} e^{j(k_1 + k_2) a} e^{j2k_2 b},$$

$$C_3 = D^{-1} f_{1t} f_{2t} f_{3t} e^{j k_1 a} e^{j k_2 b},$$

$$D = 1 + f_{2r} f_{3r} e^{j2k_2 b} + f_{1r} (f_{2r} + f_{3r} e^{j2k_2 b}) e^{j2k_1 a},$$

$$f_{1r} = (\beta_0 - k_1) / (\beta_0 + k_1), \quad f_{1t} = 1 + f_{1r},$$

$$f_{2r} = (k_1 - k_2) / (k_1 + k_2), \quad f_{2t} = 1 + f_{2r},$$

$$f_{3r} = (k_2 - k_3) / (k_2 + k_3), \quad f_{3t} = 1 + f_{3r},$$

a и b — соответственно толщины кожи и жирового слоя.

При расчете использовались известные электрофизические параметры для выбранной модели тела человека [2]. Для импульса с несущей частотой $f_0 = 100$ МГц $\epsilon_{r1} = 7,5$, $\sigma_1 = 0,10$ См/м, $\epsilon_{r2} = 7,5$, $\sigma_2 = 0,033$ См/м; $\epsilon_{r3} = 7,3$, $\sigma_3 = 0,87$ См/м. Для импульса с несущей частотой $f_0 = 3000$ МГц $\epsilon_{r1} = 4,2$, $\sigma_1 = 2,4$ См/м; $\epsilon_{r2} = 0$, $\sigma_2 = 0,101$ См/м; $\epsilon_{r3} = 4,7$, $\sigma_3 = 2,22$ См/м.

Результаты расчета пространственного распределения суммарной величины напряженности поля радиопульсов (относительно амплитуды первичного импульса) в разные моменты времени представлены на рис. 3.

Расчет проведен для случая, когда амплитуда вторичного импульса превышала амплитуду первичного в 14 раз.

Приведенная на рисунке кривая 1 соответствует моменту времени $t/T_0 = 2,7$, 2 — $t/T_0 = 2,15$, 3 — $t/T_0 = 2,81$. Здесь же для сравнения кривыми 4 и 5 показаны изменения амплитуды гармонических излучений соответственно для частот $f_0 = 100$ МГц и $f_0 = 3000$ МГц.

Как видно из рисунка, на определенной глубине вторичный импульс, имея более высокую скорость распространения, накладывается на первичный импульс. В результате в пространстве наложения импульсов суммарная амплитуда поля имеет экстремум и его величина всегда выше той, которая имеет место при отдельном распространении любого из имеющихся импульсов. При этом наибольшая концентрация энергии наблюдается в области пересечения кривых 4 и 5, характеризующих затухание гармонического излучения разных частот, что, собственно, определяет глубину концентрации энергии.

Таким образом, используя принцип импульсного облучения на различных частотах, можно серией импульсов вызвать локальный нагрев внутренних участков тела человека.

ЛИТЕРАТУРА

1. Троицкий В. С. // Изв вузов. Радиофизика. 1983. Т. 26 № 1. С. 131
2. Кинг Р., Смит Г. Антенны в материальных средах. Пер. с англ. — М., Мир, 1984. Кн. 1. — 824 с.
3. Биргер Е. С., Вайнштейн Л. А. // ЖТФ. 1976. Т. 46 № 1. С. 212.
4. Шулманис А. А. // Труды рижского политехнического ин-та. Радиотехника и связь. Исследование устройств, преобразующих электрические сигналы. 1983. С. 82.

Украинский заочный политехнический институт

Поступила в редакцию
25 марта 1987 г.,
после переработки
10 января 1989 г.

THE POSSIBILITY OF LOCAL HEATING OF HUMAN'S BODY INTERNAL ORGANS BY SERIES OF RADIO PULSES

V. D. Sahatskij, V. F. Pavlov

In this paper it is proved that if a human body is subjected to, for example, series of two periodically consecutive radio pulses with different carrier frequencies, the secondary radio pulse with more high carrier frequency catches up the first pulse at the definite depth, thus providing the possibility of human body organs heating due to energies of radio pulses.