

ПИСЬМО В РЕДАКЦИЮ

(К вопросу о фокусировке СВЧ излучения в теле человека и животных)

В настоящее время представляет интерес фокусировка СВЧ излучения в теле человека и животных в целях локального нагрева внутренних участков тела (например, при разрушении раковых образований [1]).

Представляет интерес и обратная задача — фокусировка собственного теплового радиоизлучения из отдельных внутренних областей тела. Это, в частности, существенно при измерении локальной температуры выбранных глубинных участков тела с помощью радиотермометрии (см., например, [2]).

В работе [3] предлагается для указанных выше целей способ фокусировки с помощью линзы без потерь, прикладываемой к телу человека. В качестве демонстрации возможности фокусировки в теле человека экспериментально показывается существование фокуса в чистой воде на волне 18 см. Однако, как уже отмечалось в работе [4], с помощью предлагаемой линзы или другого аналогичного устройства нельзя сфокусировать СВЧ радиоизлучение в тканях человека и животных. Это связано с тем, что ткани тела являются сильно поглощающей средой. Исследуем сначала возможность фокусировки внешнего СВЧ излучения в мышечных тканях.

Рассмотрим, как это предложено в [3], линзу без потерь, приложенную к телу и с ним согласованную (одинаковая диэлектрическая постоянная ϵ у линзы и тела). Как известно, для фокусировки излучения размеры линзы должны быть в несколько раз больше длины волны в тканях, равной $\lambda = \lambda_0/\sqrt{\epsilon}$, где λ_0 — длина волны в воздухе. С другой стороны, в поглощающей среде фокусировка имеет смысл лишь на глубине порядка глубины проникания электромагнитной волны l_0 . Для волн $\lambda_0 \leq 30$ см достаточно хорошим приближением можно считать $l_0 = \lambda/2$ по мощности. Для более длинных волн глубина проникания по мощности составляет десятые доли длины волны. Для линзы размером в несколько длин волн при столь коротком фокусном расстоянии длины путей краевых лучей, сходящихся конусом, будут во много раз больше длины центрального пучка лучей, и из-за поглощения краевые лучи не будут играть никакой роли. Например, при размере линзы 6λ крайние лучи проходят путь 3λ и затухнут в e^6 раз. Ясно, что в этом случае фокусное пятно будет определяться только центральной частью линзы размером порядка λ , т. е. никакой фокусировки не будет. Целесообразный размер линзы определяется очевидным соотношением $\eta < 2l_0$.

Таким образом, для фокусировки в сильно поглощающей среде казалось принципиально необходимо использовать длиннофокусную линзу, для которой размер D должен быть порядка фокусного расстояния F . Беря $D=F=10\lambda$, мы получим пятно в фокальной плоскости размером между нулями, равным $x=\lambda F/D=\lambda$, однако для мышечной ткани поток будет ослаблен в нем в $e^{20}/100 \approx e^{15}$ раз! Нетрудно видеть, что 93% мощности будет поглощено в столбе толщиной $3l_0 \approx 1,5\lambda$, т. е. в непосредственной близости к линзе. Итак, во всех случаях нагрев осуществляется в цилиндре с основанием, равным размеру линзы D и высотой l_0 . Из всего сказанного видна невозможность фокусировки излучения в мышечной и других, богатых кровью тканях человека. Фокусировка в жировом слое, где $\epsilon \approx 6$ и глубина проникания $l_0 \approx 3\lambda/2$, приводит к максимальному размеру линзы $D=2l_0=3,0\lambda$, что также практически не дает фокусировки.

Таким образом, применение фокусировки с помощью непоглощающих линз или других способов не дает ожидаемого эффекта в сильно поглощающей среде и, в частности, в теле человека и животных. В силу сказанного, для нагрева участков тела человека с предельным разрешением, как известно, равным λ , достаточно применения антенны диаметром $D = \lambda$, что обычно и делается. Интересно отметить, что применение линзы с поглощением, равным поглощению в среде, из-за таутохронности лучей приводит к выравниванию интенсивностей краевых и центральных лучей вблизи фокуса, тем не менее основная мощность будет поглощена в слое $\sim l_0$, причем главным образом под краями линзы. В работе [3] приведены результаты экспериментального исследования фокусировки как раз для этого случая. Линза из чистой воды фокусирует излучение на волне 18 см в среду из той же чистой воды. Применим приведенный выше расчет для этого случая, для которого $\lambda=2$ см, $l_0 \approx 7$ см $=3,5\lambda$, фокусное расстояние $F=10$ см $=1,4l_0$. Размер линзы не приведен. Согласно сказанному выше действующий размер линзы будет примерно равен $D=2l_0=7\lambda=14$ см. Если геометрический размер был больше или равен этому, то ширина фокального пятна между нулями будет определяться значением $x=\lambda F/D \approx 1,5\lambda=3$ см, что и наблюдалось. В этом примере фокусировка естественно получается вследствие того, что чистая вода для СВЧ почти на порядок прозрачнее биологических тканей.

Рассмотрим теперь возможность использования фокусировки для приема внутреннего теплового радиоизлучения от выделенных фокусом областей. Это позволило

бы увеличить разрешающую силу измерения глубинной температуры человеческого тела как по глубине, так и по поверхности. При этом применение фокусирующих систем с потерями исключается, так как их поглощение и собственное тепловое радиоизлучение будут вносить изменения в сигнал, неподдающиеся контролю с достаточной точностью. Очевидно, что фокус должен быть расположен также на глубине порядка l_0 (или не более $2l_0$). Фокусирующая система, например линза без потерь, будет собирать с этого расстояния излучение, примерно одинаково ослабленное как для лучей, идущих в центр, так и на краях, если ее размер будет $D < 2l_0$. Для нашего случая $l_0 = \lambda/2$ и $D \approx \lambda$, т. е. фокусирующее действие будет отсутствовать. Такая антенна будет собирать излучение из цилиндра основанием $D = \lambda$ и высотой $l_0 = \lambda/2$. Действительно, зона Фраунгофера такой антенны начинается с расстояния $2D^2/\lambda = 2\lambda$, где сечение диаграммы расширяется и будет $2D$, однако излучение с этого уровня дойдет ослабленным в e^4 раз, т. е. оно уже не существенно. Следовательно, при $D \approx \lambda$ излучение собирается из части «прожекторной» зоны диаграммы антенны на глубину $(1+2)l_0$.

Итак, применение больших контактных фокусирующих систем для нагрева или приема излучения тела человека и животных не дает увеличения разрешающей силы по сравнению с антенной с плоским фронтом волны размером λ , образованной, например, открытым концом волновода или полуволновым диполем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Девятков Н. Д., Гельвич Э. А. и др. — УФН, 1981, 134, вып. 1, с. 158.
2. Троицкий В. С. — Изв. вузов — Радиофизика, 1981, 24, № 9, с. 1054.
3. Штейншлегер В. Б., Месежников Г. С., Семский А. Г. — УФН, 1981, 134, вып. 1, с. 163; ДАН СССР, 1981, № 5, с. 1108.
4. Троицкий В. С., Густов А. В., Белов И. Ф. и др. — УФН, 1981, 134, вып. 1, с. 155.

В. С. Троицкий
