

УДК 61 → 621 396.6 536.58

РАДИОТЕРМОМЕТР 60-САНТИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ВОЛН И НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ В МЕДИЦИНСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ

*В. Л. Рахлин, М. М. Зубов, Т. С. Куприянова,
И. А. Гетманцева*

Сообщается о созданном в НИРФИ медицинском радиотермометре 60-сантиметрового диапазона волн, позволяющем измерять температуру глубоких тканей и органов человека в столбе до 5 см в мышцах и до 15 см в жировых слоях с погрешностью не более 0,1° С. Приводится пример применения радиотермометра в диагностике и наблюдении за ходом лечения детей, страдающих детским церебральным параличем.

Радиотермометрия — неинвазивное измерение температуры глубоких тканей и органов человека по их собственному тепловому радиоизлучению — насчитывает немногим более 10 лет [1–6]. Созданный в НИРФИ модуляционный радиометр 60-сантиметрового диапазона волн для радиотермометрии — единственный в СССР — собран по схеме прямого усиления. Этим исключается опасность СВЧ облучения пациента в случае попадания сигнала гетеродина в антенную цепь радиометра, что могло бы произойти в супергетеродинном приемнике. Для устранения ошибок измерения, вызываемых неполным согласованием контактной антенны с телом человека, в нем применено регулируемое «подшумливание» антенны [7–9]. Входные цепи радиометра, схема которых показана на рис. 1, содержат два ферритовых циркулятора, двухдиодный

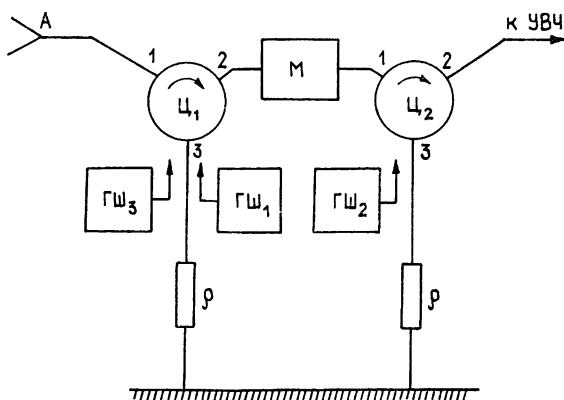


Рис. 1.

модулятор отражающего типа [10] и три шумовых генератора на лавинно-пролетных диодах. Первый генератор шума ГШ₁ служит для подшумливания антенны до температуры 37° С, как это описано в работе [8]. Второй генератор шума ГШ₂ служит для балансировки плеч модулятора и компенсирует шум потерь антенного тракта. Величина сигнала ГШ₂ такова, что добавляет несколько градусов в третье плечо второго циркулятора и подбирается при начальной регулировке радиометра. Оба эти генератора — ГШ₁ и ГШ₂ — постоянно включены и ра-

ботають непрерывно. Третий генератор шума ГШ₃ служит только для определения коэффициента отражения сигнала на границе контактная антенна — тело человека и включается лишь на время этого измерения. Процесс измерения коэффициента отражения такой: вначале определяется по выходному прибору радиометра или самопишущего гальванометра условный нуль сигнала. Затем антенна направляется в пространство и включается ГШ₃. Поскольку контактная антенна практически полностью рассогласована с пространством, сигнал ГШ₃ полностью ею отражается, поступает на вход радиометра и дает на его выходе напряжение, фиксируемое, как $\alpha_{\text{простр}}$. После этого антенна устанавливается на тело человека, с которым она в какой-то мере согласована. Сигнал ГШ₃ от тела отражается не полностью и отмечается выходным прибором радиометра как $\alpha_{\text{тела}}$. Коэффициент отражения по мощности равен отношению показаний выходного прибора: $\Gamma^2 = \alpha_{\text{тела}} / \alpha_{\text{простр}}$. Измерение коэффициента отражения может служить не только для определения качества конкретной антенны, но и для некоторых диагностических целей. Так, например, по коэффициенту отражения можно судить о степени консолидации кости при переломе: если ставить антенну, предположим, на конечность, находящуюся в аппарате Илизарова [11]. выше перелома, ниже перелома и над переломом, то, до тех пор пока не наступит достаточная консолидация, коэффициент отражения в месте перелома несколько меньше, чем в области неповрежденной кости. При измерении коэффициента отражения в тракт усилителя радиометра вводится ослабление около 20 дБ. Это делается для того, чтобы, во-первых, исключить влияние сигнала теплового радиоизлучения человека и, во-вторых, устранить наблюдаемые флуктуации выходного напряжения прибора. Для отчетливого наблюдения отраженного сигнала на выходном приборе подбирается сигнал ГШ₃ с температурой несколько сот градусов. При такой мощности генератора шума облучение пациента в тысячи раз меньше, чем он получает от ежедневной соляризации на открытом воздухе, и совершенно безвредно для человека. Пример записи на самопишущем гальванометре КСП-4 при измерении коэффициента отражения перелома бедренной кости показан на рис. 2.

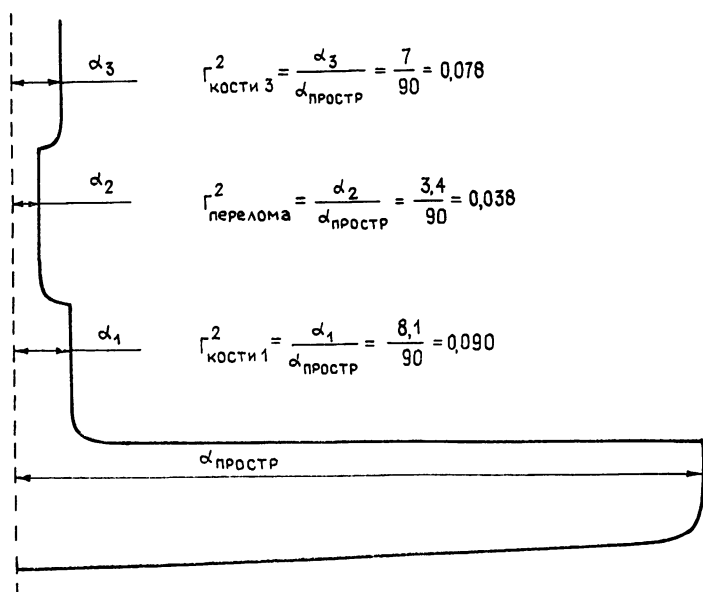


Рис. 2.

Основные параметры радиометра следующие: средняя частота полосы частот принимаемого сигнала 500 МГц, энергетическая полоса пропускания 50 МГц, полоса пропускания синхронного интегратора 0,5 Гц, полоса пропускания фильтра постоянного тока 1/16 Гц, что соответствует постоянной времени 4 с. Флуктуационный порог чувствитель-

ности радиометра при этом значении постоянной времени 0,025 К, усиление тракта подобрано таким, что шкала самопишущего гальванометра КСП-4, рассчитанная на 10 мВ, соответствует 10 К. Регулировкой установки нуля можно смещать шкалу и измерять температуру тканей в пределах от 20 до 50° С. При этом погрешность измерения гарантируется не более 0,1° С только в интервале температур от 35 до 39° С. За этими пределами погрешность измерения может увеличиться до значения $\Delta T = (T_x - 37) \cdot 1_x^2$, где 37° С — температура антенны от генератора шума ГШ, T_x — измеряемая температура пациента, Γ_x^2 — коэффициент отражения по мощности в измеряемой области тела человека.

Для калибровки радиотермометра нами применяются эталоны теплового радиоизлучения. В качестве излучателя в них используется термостатированная вода: среда наиболее близко подходящая по электрическим параметрам к живой человеческой ткани. Вода находится в прямоугольных бачках глубиной 120 мм. Один эталон термостатирован при температуре $33 \pm 0,05^\circ \text{С}$, а второй — при температуре $38 \pm 0,05^\circ \text{С}$. Для калибровки радиотермометра контактную антенну представляют к воде через лавсановую пленку толщиной 25 мкм. Коэффициент отражения у контактной антенны с эталонами теплового радиоизлучения не превышает 0,02. Это соответствует точности калибровки 0,05 К. Устанавливая для измерений антенну поочередно на эталоны и на тело человека, получаем, соответственно, показания выходного прибора радиотермометра или самопишущего гальванометра $\alpha_{\text{э1}}$, $\alpha_{\text{э2}}$ и $\alpha_{\text{тела}}$. Тогда искомая температура определяется выражением

$$T_{\text{тела}} = (T_{\text{э2}} - T_{\text{э1}}) \frac{\alpha_{\text{тела}} - \alpha_{\text{э1}}}{\alpha_{\text{э2}} - \alpha_{\text{э1}}} + T_{\text{э1}}.$$

В 60-сантиметровом диапазоне волн много электромагнитных помех, источниками которых являются электробытовые приборы, искровое зажигание в карбюраторных двигателях автомашин, рентгеновские установки и многие физиотерапевтические аппараты. Эти помехи, падающие в антенну радиометрического термометра, имеют величину до десятых долей ватта, тогда как мощность сигнала радиоизлучения человека, соответствующая погрешности измерения $\Delta T = 0,1 \text{ К}$, составляет всего

$$P = kT\Delta f = 1,38 \cdot 10^{-23} \times 0,1 \cdot 50 \cdot 10^6 = 6,9 \cdot 10^{-17} \text{ Вт}.$$

Следовательно, уровень помехи может в миллиарды раз превышать уровень полезного сигнала. Это приводит к необходимости проведения радиотермометрии в экранированной кабине, дающей ослабление внешних помех на 100—120 дБ.

Описанный радиотермометр эксплуатировался в течение нескольких лет в Горьковском научно-исследовательском институте травматологии и ортопедии (ГНИИТО). Измерялось распределение глубинной температуры тканей и органов у больных с различной патологией, исследовалось влияние на глубинную температуру некоторых физиотерапевтических процедур [12]. Здесь следует особо подчеркнуть, что в отличие от тепловидения, дающего информацию о температуре эпидермиса, радиотермометрия позволяет измерять непосредственно абсолютное значение глубинной температуры. Это, в свою очередь, дает возможность определения мгновенной реакции организм на медикаментозные (например, нитроглицерин) и физиотерапевтические (например, ультразвук, синусоидальные токи и др.) воздействия.

В этом плане показательны измерения глубинной температуры у детей, страдающих детским церебральным параличом (ДЦП). Была обследована группа детей — 21 мальчик и 19 девочек в возраст от 3 до 15 лет. Из них половина страдали ДЦП, а другие — практически здоровые дети. В связи с тем, что у больных ДЦП патологически изменяются четырехглавые мышцы бедер, ягодичные мышцы, а также мышцы тазобедренного сустава, у всех детей — как у больных ДЦП, так

и у здоровых — были проведены радиотермометрические измерения глубинной температуры всех перечисленных областей. После измерений дети получали лечебную дозу электростимуляции синусоидальными модулированными токами низкой частоты (СМТ) на четырехглавую мышцу бедра, обычно наиболее пораженную при ДЦП. Применяли третий род работы: модуляция 30 Гц при глубине 100%, длительность импульсов 3 секунды. Силу тока постепенно увеличивали до появления слабых видимых сокращений мышц, в среднем до 12—14 миллиампер. Процедура продолжалась 10 минут. Эта физиотерапевтическая процедура способствует улучшению функционального состояния нервной системы, кровоснабжения тканей и трофических процессов. Измерение глубинной температуры проводилось в экранированной кабине по изложенной выше методике. Сразу по окончании физиотерапевтической процедуры, выполнявшейся тут же в экранированной кабине, измерения глубинной температуры проводились вновь, затем через 30 минут, а у здоровых детей еще и через 60 минут. Меньшая длительность наблюдения за ходом изменения температуры у больных ДЦП обусловлена тем, что для них длительный процесс врачебного наблюдения был слишком утомителен.

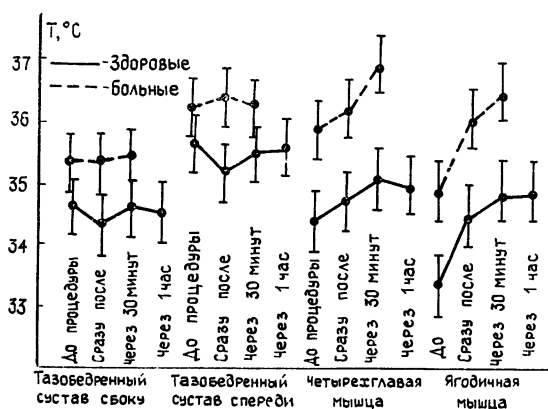


Рис. 3. Распределение глубинной температуры у детей, здоровых и страдающих детским церебральным параличом.

Результаты измерений, статистически обработанные с доверительной вероятностью 0,99, приведены в графике на рис. 3. Из него видно, что в зоне четырехглавой и ягодичной мышц глубинная температура больных детей на 1,5 градуса выше, чем у здоровых, а в области тазобедренного сустава у детей с ДЦП превышение температуры составляет 0,7—0,8 градуса. Сразу по окончании процедуры СМТ у больных ДЦП температура четырехглавой мышцы повысилась на 0,3°, а через 30 минут после процедуры повышение температуры достигло 1,1°. Температура ягодичной мышцы поднялась, соответственно, на 1,2—1,6 градуса. У здоровых детей после процедуры СМТ четырехглавая мышца нагрелась на 0,3°, через 30 минут — на 0,7° и через час сохранилась на том же уровне. Ягодичная мышца у них, так же как и у больных, нагрелась, соответственно, на 1,1°, затем еще на 0,4° и через час осталась на этом же уровне. Тазобедренный сустав у здоровых детей заметно охладился, в то время как у больных — нагрелся. Повышение глубинной температуры мышц после сеанса СМТ свидетельствует об усилении их кровоснабжения, улучшении метаболизма, а у больных детей, кроме того, об уменьшении спазм мышц.

Результаты проведенных исследований позволяют считать, что радиотермометрия может способствовать диагностике, выбору целесооб-

разных доз физиотерапевтических лечебных процедур при ДЦП и наблюдении за длительным процессом лечения в динамике.

В заключение авторы статьи благодарят В. С. Троицкого за интерес к работе и ряд полезных рекомендаций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Enander B., Larson G. // *Electronics Letters*. 1974. V. 10. № 15. P. 317.
2. Barrett A. H., Myers P. C. // *Science*. 1975. V. 190. № 4215. P. 669.
3. Троицкий В. С., Густов А. В., Белов И. Ф. и др. // *УФН*. 1981. Т. 134. Вып. 1. С. 155.
4. Barrett A. H., Myers P. C., Sadowsky N. L. // *Radio Science. Supplement*. 1977. V. 12. P. 167.
5. Троицкий В. С., Абрамов В. И., Аранжереев Е. А. и др. Препринт НИРФИ № 131. Горький, 1979.
6. Рахлин В. Л., Зубов М. М., Плечков В. М. // *Изв. вузов. Радиофизика*. 1982. Т. 25. № 8. С. 958.
7. Ludeke K. M., Schiek B., Kohler J. // *Electronics Letters*. 1978. V. 14. № 6. P. 194.
8. Рахлин В. Л. // *Изв. вузов. Радиофизика*. 1984. Т. 27. № 9. С. 1204.
9. Троицкий В. С. Препринт НИРФИ № 186. Горький, 1984.
10. Рахлин В. Л., Родина В. М., Зубов М. М., Закаатов В. А. // *ПТЭ*. 1970. № 2. С. 151.
11. Краснов А. Ф., Савин А. М. // *Вестник хирургии им. Грекова*. 1984. Т. 132. № 5. С. 87.
12. Троицкий В. С., Зубов М. М., Рахлин В. Л. и др. // *Сб. трудов все-союзной конференции «Методические вопросы определения температуры биологических объектов радиофизическими методами»*. М.: АН СССР, 1985.

Научно-исследовательский
радиофизический институт

Поступила в редакцию
3 июля 1987 г.

60 CM WAVE RANGE RADIOMETER AND SOME RESULTS OF ITS APPLICATION IN MEDICAL DIAGNOSIS

V. L. Rakhlin, M. M. Zubov, T. S. Kupriyanova, I. A. Getmantseva

60 cm wave range medical radiometer has been created at NIRFI which permits one to measure temperature of the tissue depth and the man organs in a column up to 5 cm in muscle and up to 15 cm in fat layers with an error of no more than 0,1°C. An example is given for the radiometer application in diagnosis and observation of medical treatment of childrens suffering from infant cerebral paralysis.
