

УДК 621.375

DOI: 10.15587/2312-8372.2018.123737

СИНТЕЗ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ ПРИЕМНИКОВ ПО КРИТЕРИЮ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ИНВАРИАНТНОСТИ К ФЛУКТУАЦИЯМ УСИЛЕНИЯ И УЗКОПОЛОСНОЙ ПОМЕХИ

Гуцол Т. Д., Попрядухін В. С., Попова І. А., Косуліна Н. Г., Черенков О. Д.

1. Введение

Одной из особенностей современного этапа развития сельского хозяйства в Украине является рост экономических и совершенствование логических предпосылок до уровня потребностей промышленного животноводства, слияние ветеринарной и зоотехнической наук с промышленным животноводством и усиление их влияния непосредственно на процессы производства. Промышленное животноводство предъявляет к ветеринарии ряд требований к особенностям ее функционирования при поточном производстве с учетом биологических, экономических и организационных факторов. Так, систематический контроль состояния здоровья животных становится необходимым условием оптимального функционирования животноводческих комплексов, а его совершенствование – одной из важнейших задач ветеринарной науки и передовой практики [1].

Как показывает анализ литературы по данному вопросу, отклонение температуры от нормы может быть вызвано условием содержания, рационом питания, различными физическими нагрузками. Поэтому контроль температуры должен стать составной частью технологического процесса производства продуктов животноводства [2, 3].

В ветеринарной практике для измерения температуры тела животного используют контактный метод измерения температуры максимальным термометром Цельсия, электротермометром. Недостатки этого метода заключается в том, что неисправность термометра или неумелое его введение в прямую кишку нередко приводит к ранениям или разрывам слизистой оболочки прямой кишки, вследствие чего развивается воспалительный процесс. К недостаткам также следует отнести фиксацию животного, что приводит к стрессовым состояниям и снижает резистивность организма животного. Измерение температуры термометрами небезопасно для самого обслуживающего персонала и имеет продолжительность измерения (10–15 мин на одно животное) [4]. В связи с этим нет возможности вести контроль температуры животных у стада с большим количеством голов.

Поэтому возникает потребность в экспрессных бесконтактных методах контроля температуры животных. К бесконтактным приборам измерения тела у объектов следует отнести тепловизоры [5]. Однако применение тепловизоров связано со следующими сложностями: фиксация животного; специальная подготовка поверхности кожи животного для измерения показаний температуры. Поэтому предпочтение следует отдать дистанционному методу,

основанному на приеме и определении интенсивности теплового излучения внутренних тканей животных в радиодиапазоне. На сегодня доказано, что многие метаболические процессы в клетках происходят в крайне высокочастотном поле (КВЧ) миллиметрового диапазона длин волн (30–40 ГГц), которое создается грибообразными ансамблями митохондрий. Мощность электромагнитного излучения тканей и органов животных составляет величину 10^{-15} – 10^{-20} Вт.

Радиотермометрия обладает рядом положительных свойств, к которым относятся:

- диагностика заболеваний на ранних стадиях из-за достаточно большой глубины обнаружения аномалий (3–10 см);
- возможность неинвазивного обнаружения патологии внутренних органов до наступления структурных изменений, обнаруживаемых рентгеновскими или ультразвуковыми исследованиями;
- полная безвредность для животных и для обслуживающего персонала;
- возможность неоднократных измерений.

Из анализа существующих радиоизмерительных приёмников электромагнитного излучения следует, что их чувствительность измерений в миллиметровом диапазоне не превышает величины 10^{-10} Вт и зависит от флуктуаций коэффициента усиления и действия узкополосной помехи.

Поэтому необходимость в разработке радиометрического приёмника для дистанционного измерения электромагнитного теплового излучения (температуры) органов и тканей животных является актуальной задачей. Радиометрический приёмник бесконтактно позволит контролировать температуру, как кожи, так и внутренних органов животного, без его фиксации, в любое время суток и при любых погодных условиях [6].

2. Объект исследования и его технологический аудит

Объект исследования – процесс синтеза радиометрического приёмника для дистанционного измерения собственного теплового электромагнитного излучения животных. Из анализа существующих приёмников электромагнитного излучения следует, что их чувствительность измерений зависит от флуктуаций коэффициента усиления (КУ) [5]. Это свидетельствует о больших технических трудностях, связанных с устранением или компенсацией влияния флуктуаций КУ в высокочувствительных приемниках. Рациональные пути повышения чувствительности радиометрических приемников состоят в следующем [6]:

- разработка новых схем;
- совершенствование известных схем (уменьшение шумов приемника, расширение полосы пропускания по высокой частоте, увеличение времени интегрирования, стабилизация элементов приёмника).

Уменьшение уровня внутренних шумов возможно за счет использования малошумящих элементов и узлов, однако это, как и расширение полосы пропускания по ВЧ, ограничено техническими и конструктивными возможностями и определяется уровнем развития элементной базы на данный

период. Все технические решения, используемые при создании радиометрических приемников, сводятся к следующим задачам:

- компенсации внутренних шумов;
- компенсации влияния нестабильности тракта усиления и преобразования на шумовую температуру приемника;
- исключению влияния нестабильности тракта усиления и преобразования на шумовую температуру приемника;
- исключению влияния нестабильности тракта усиления и преобразования на полезный сигнал.

Таким образом, можно сделать вывод, что при построении радиометрических систем в миллиметровом диапазоне следует учитывать следующие определяющие недостатки:

- из-за низкой чувствительности детекторов и отсутствия малошумящих твердотельных усилителей высокой частоты радиометрические приемники необходимо строить по супергетеродинной или модуляционной схеме;
- для обеспечения высокой чувствительности (менее 0,1 К) радиометрического приемника необходимо применять различные методы устранения влияния нестабильности тракта усиления на выходной сигнал.

В этой связи необходимо отыскать структуру приемника для измерения теплового электромагнитного излучения животных (температуры), который, наряду со всеми достоинствами компенсационного, обладал бы нечувствительностью к флуктуациям коэффициента усиления и воздействию наиболее вероятной узкополосной помехи в условиях содержания животных.

3. Цель и задачи исследования

Целью работы является синтез структуры радиометрического приемника в миллиметровом диапазоне длин волн по критерию статистической инвариантности к флуктуациям коэффициента усиления и узкополосной помехе.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи:

1. Обосновать обобщенную схему радиоприёмника.
2. Получить выражения для импульсной характеристики входной цепи и квадратичного детектора без узкополосной помехи гармонического типа.
3. Получить выражения для импульсной характеристики входной цепи и квадратичного детектора с узкополосной помехой.
4. Обосновать схему синтезированного радиоприёмника, который является инвариантным по отношению к флуктуациям коэффициента усиления и полностью инвариантным по отношению к узкополосной помехи гармонического типа.

4. Исследование существующих решений проблемы

Литературный анализ показывает, что продуктивность сельскохозяйственных животных зависит от их содержания, рационального использования кормов и оперативного лечения, которое определяется

своевременным диагнозом [7, 8]. Решение этих вопросов связано с использованием экспрессных методов контроля параметров, характеризующих физиологическое состояние животных. Одним из таких информативных параметров физиологического состояния животных является их собственное электромагнитное излучение (температура), так как все методы измерения температуры основаны на преобразовании её в другую физическую величину [9, 10]. Преимущества методов радиотеплового электромагнитного излучения для анализа состояния животных перед известными (клиническая и рентгенологическая диагностика) заключаются в отсутствии хирургического вмешательства. Радиотепловой метод не требует специальной подготовки животных. При электромагнитной диагностике животных у них отсутствуют болевые ощущения [11].

Проведенный анализ методов и устройств измерения температуры животных показывает, что существует необходимость в разработке бесконтактных устройств. Бесконтактные устройства позволяют контролировать температуру как кожи, так и внутренних органов животного без его фиксации, в любое время суток и при любых погодных условиях [12, 13].

В настоящее время известны макеты и методики дистанционного исследования излучений живых биологических объектов (человека и животных) в инфракрасном (ИК) сантиметровом и дециметровом диапазонах длин волн [14]. В ИК диапазоне радиотепловое излучение исходит из глубины 10 мкм, и для проведения исследований необходима гладкая, чистая, сухая поверхность кожи, для чего требуется специальная предварительная подготовка кожи животных. Данная подготовка кожи животных является существенным недостатком в условиях проведения экспериментальных исследований в заданном частотном диапазоне. Радиотепловое излучение сантиметрового и дециметрового диапазонов длин волн хотя и обладает характерной глубиной затухания в биологических тканях до нескольких сантиметров, однако не обеспечивает необходимое пространственное разрешение при измерениях из открытого пространства. Кроме того, использование контактных антенн-аппликаторов в естественных условиях содержания животных неприемлемо из-за неизбежного несогласования импедансов кожи животных и контактной антенны. Это несогласование импедансов вызвано наличием волосяного покрова, частиц пыли и грязи между поверхностью кожи животного и контактной антенной [15]. Из анализа биофизических и биохимических процессов, происходящих в клетках живого организма, следует, что кинетика биологических процессов происходит в миллиметровом диапазоне длин волн и для него оказываются прозрачными ороговевшие слои эпидермиса, волосяной покров, возможные частицы пыли и грязи на поверхности кожи [16]. Поэтому исследование радиотеплового излучения сельскохозяйственных животных целесообразно осуществлять в миллиметровом диапазоне длин волн. Из анализа схемных решений радиоприёмников для дистанционного измерения собственного излучения животных следует, что их предельная (флуктуационная) чувствительность зависит только от естественных шумов и нестабильности коэффициента усиления линейного тракта [17]. Это

свидетельствует о больших технических трудностях, связанных с устранением или компенсацией влияния флуктуаций коэффициента усиления в высокочувствительных приемниках. В этой связи необходимо отыскать структуру приёмника, который обладал бы нечувствительностью к флуктуациям коэффициента усиления и воздействию узкополосной помехи.

5. Методы исследований

Рассмотрим обобщенную схему радиометрического приёмника, представленную на рис. 1.

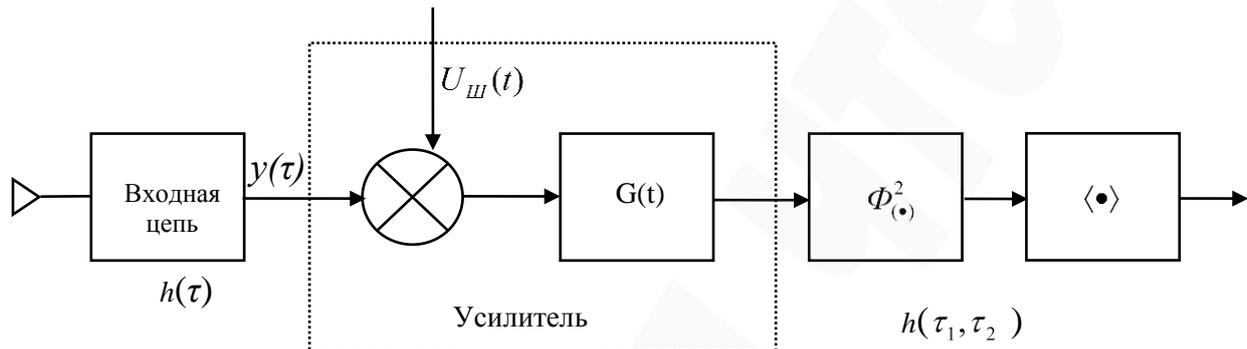


Рис. 1. Обобщенная функциональная схема радиометрического приёмника

Схема (рис. 1) состоит из последовательно соединенных линейной входной цепи, куда поступают входной сигнал $u_C(t)$ и адаптивная помеха $u_{II}(t)$. Усилитель в схеме характеризуется коэффициентом усиления по мощности $G(t)$, полосой пропускания Δf и собственным шумом $u_{III}(t)$. На схеме знак $\Phi^2(\bullet)$ означает операцию обобщенного квадратичного детектирования, а знак $\langle \bullet \rangle$ – операцию усреднения. На основании общепринятых предположений процессы $u_C(t)$ и $u_{III}(t)$ считаем эргодическими, нормальными случайными процессами типа квазибелого шума, действующего в полосе пропускания усилителя, а помеху $u_{II}(t)$ для простоты вычислений, примем чисто гармонической [6]:

$$\begin{aligned} \langle u_C(t) \rangle = u_{III}(t) = 0, \quad \langle u(t) \rangle &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt, \\ \langle u_C(t) u_C(t + \tau) \rangle &= \kappa T_C^0 \frac{\sin \pi \Delta f \tau}{\pi \Delta f \tau}, \quad \langle u_{III}(t) u_{III}(t + \tau) \rangle = \kappa T_{III}^0 \frac{\sin \pi \Delta f \tau}{\pi \Delta f \tau}, \\ u_{II}(t) &= U_{II0} \cos(2\pi f_{II} t + \varphi_{II}), \end{aligned} \quad (1)$$

где κ – постоянная Больцмана; T_C^0 , T_{III}^0 – спектральная плотность шумовой температуры полезного сигнала и собственного шума радиометрического приёмника, причем $T_{III}^0 \gg T_C$; U_{II0} – амплитуда гармонической помехи; f_{II} , φ_{II} – частота и начальная фаза колебаний помехи.

Задача разрешается в два приема: вначале проводится синтез схемы радиометрического приёмника в отсутствии помехи, а затем рассматривается случай, когда на выходе радиометрического приёмника действует аддитивная смесь гармонической помехи полезного сигнала. Предположим, что $U_{\text{ПО}} = 0$. В результате преобразований, изложенных в [6], усредненное значение сигнала, после схемы квадратичного детектирования, будет определяться выражением:

$$(y(t) + u_{\text{ш}}(t)) = \sqrt{1 + g(t)},$$

где $y(t)$ – аддитивная смесь сигнала, прошедшего входные цепи;

$u_{\text{ш}}(t)$ – аддитивная смесь шума, в полосе пропускания усилителя Δf ;

$g(t)$ – случайная функция, определяющая относительные флуктуации коэффициента усиления, будет следующей:

$$\Phi^2(y, u_{\text{ш}}, g) \approx (1 + g(t)) \int \int h_2(\tau_1, \tau_2) \langle u_{\text{ш}}(t - \tau_1) u_{\text{ш}}(t - \tau_2) \rangle d\tau_1 d\tau_2, \quad (2)$$

где $h_2(\tau_1, \tau_2)$ – импульсная характеристика квадратора.

Как следует из теории инвариантности [5] и из работы [6], для того, чтобы усредненное значение выходного сигнала квадратора было инвариантным к флуктуациям коэффициента усиления, необходимо выполнение условия:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int h_2(\tau_1, \tau_2) \langle u_{\text{ш}}(t - \tau_1) u_{\text{ш}}(t - \tau_2) \rangle d\tau_1 d\tau_2 = 0. \quad (3)$$

Таким образом, необходимо отыскать структуру квадратора, импульсная характеристика $h_2(\tau_1, \tau_2)$ которого удовлетворяла бы условию (3). Это условие имеет следующий вид [6]:

$$u_{\text{ш}}^2(t) = \kappa T_{\text{ш}}^0 \Delta f \sum_{K=-\infty}^{\infty} \int \int h_2(\tau_1, \tau_2) \frac{\sin 2\pi \Delta f \left(\tau_1 - \frac{K}{2\Delta f} \right)}{2\pi \Delta f \left(\tau_1 - \frac{K}{2\Delta f} \right)} \times$$

$$\times \frac{\sin 2\pi \Delta f \left(\tau_2 - \frac{K}{2\Delta f} \right)}{2\pi \Delta f \left(\tau_2 - \frac{K}{2\Delta f} \right)} d\tau_1 d\tau_2 = 0, \quad (4)$$

где $\frac{K}{2\Delta f}$ – интервал отсчета, определяемый полосой пропускания усилителя.

Поскольку $h_2(\tau_1, \tau_2)$ не зависит от K , то условие (4) может быть выполнено, если удовлетворяется равенство для $\forall \in (-\infty; \infty)$:

$$0 < q < 1,$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h_2(\tau_1, \tau_2) \frac{\sin 2\pi\Delta f \left(\tau_1 - \frac{K}{2\Delta f} \right)}{2\pi\Delta f \left(\tau_1 - \frac{K}{2\Delta f} \right)} \cdot \frac{\sin 2\pi\Delta f \left(\tau_2 - \frac{K}{2\Delta f} \right)}{2\pi\Delta f \left(\tau_2 - \frac{K}{2\Delta f} \right)} d\tau_1 d\tau_2 = 0. \quad (5)$$

Предположим, что:

$$h_2(\tau_1, \tau_2) = q\delta\left(\tau_1 - \frac{K}{2\Delta f}\right)(1-q)\delta\left(\tau_2 - \frac{K}{2\Delta f}\right), \quad (6)$$

где $0 < q < 1$ – весовой коэффициент; l и $m=1, 2, 3, \dots$ – целые положительные числа. Тогда очевидны равенства для всех l, m, K причем, $l \neq K, m \neq K$:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta\left(\tau - \frac{l}{2\Delta f}\right) \frac{\sin 2\pi\Delta f \left(\tau - \frac{K}{2\Delta f} \right)}{2\pi\Delta f \left(\tau - \frac{K}{2\Delta f} \right)} d\tau = \frac{\sin 2\pi\Delta f \left(\frac{2-K}{2\Delta f} \right)}{2\pi\Delta f \left(\frac{2-K}{2\Delta f} \right)} = 0, \quad (7)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta\left(\tau - \frac{m}{2\Delta f}\right) \frac{\sin 2\pi\Delta f \left(\tau - \frac{K}{2\Delta f} \right)}{2\pi\Delta f \left(\tau - \frac{K}{2\Delta f} \right)} d\tau = \frac{\sin 2\pi\Delta f \left(\frac{m-K}{2\Delta f} \right)}{2\pi\Delta f \left(\frac{m-K}{2\Delta f} \right)} = 0,$$

если $l=K$ или $m=K$, то первый или второй интеграл равен 1. Однако, так как $l \neq m$, равенство [5], будет выполняться для любых l, K, m . Поскольку l и m могут принимать произвольные значения, то положим $l=0, m=1$. Тогда,

$$h_2(\tau_1, \tau_2) = q(q-1)\delta(\tau_1)\delta\left(\tau_2 - \frac{1}{2\Delta f}\right). \quad (8)$$

Далее найдем выражение для импульсной характеристики входной цепи $h(\tau)$. Как показано в работах [6], полезный сигнал на выходе квадратичного детектора, с учетом [8], будет иметь вид:

$$\begin{aligned}
y^2(t) &= u_C^2 \text{ БЛИХ}(t) = q(q-1) \sum_{K_1=-\infty}^{\infty} \sum_{K_2=-\infty}^{\infty} u_C \left(t - \frac{K}{2\Delta f} \right) u_C \left(t - \frac{K_2+1}{2\Delta f} \right) \times \\
&\times \int_{-\infty}^{\infty} \int h_2(\tau_1, \tau_2) \frac{\sin 2\pi\Delta f \left(\tau_1 - \frac{K}{2\Delta f} \right)}{2\pi\Delta f \left(\tau_1 - \frac{K_1}{2\Delta f} \right)} \times \\
&\times \frac{\sin 2\pi\Delta f \left(\tau_2 - \frac{K_2+1}{2\Delta f} \right)}{2\pi\Delta f \left(\tau_2 - \frac{K_2+1}{2\Delta f} \right)} \cdot h(\tau_1)h(\tau_2) d\tau_1 d\tau_2 = \\
&= q(q-1)KT_c^0 \Delta f \sum_{K=-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int h_2(\tau_1, \tau_2) \frac{\sin 2\pi\Delta f \left(\tau_1 - \frac{K}{2\Delta f} \right)}{2\pi\Delta f \left(\tau_1 - \frac{K}{2\Delta f} \right)} \times \\
&\times \frac{\sin 2\pi\Delta f \left(\tau_2 - \frac{K+1}{2\Delta f} \right)}{2\pi\Delta f \left(\tau_2 - \frac{K+1}{2\Delta f} \right)} \cdot h(\tau_1)h(\tau_2) d\tau_1 d\tau_2
\end{aligned} \tag{9}$$

Поскольку,

$$u_C \left(t - \frac{K_1}{2\Delta f} \right) u_C \left(t - \frac{K_2+1}{2\Delta f} \right) = kT_c^0 \Delta f \delta_{k_1, k_2+1},$$

где δ_{k_1, k_2+1} – символ Кронекера. Из (9) видно, что полезный сигнал будет максимален, если будет максимально выражение:

$$\sum_{K=-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int \frac{\sin 2\pi\Delta f \left(\tau_1 - \frac{K}{2\Delta f} \right)}{2\pi\Delta f \left(\tau_1 - \frac{K}{2\Delta f} \right)} \cdot \frac{\sin 2\pi\Delta f \left(\tau_2 - \frac{K+1}{2\Delta f} \right)}{2\pi\Delta f \left(\tau_2 - \frac{K+1}{2\Delta f} \right)} \cdot h(\tau_1)h(\tau_2) d\tau_1 d\tau_2. \tag{10}$$

Это условие будет выполняться, если в свою очередь будут максимальны интегралы, хотя бы для одного K .

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin 2\pi\Delta f \left(\tau_1 - \frac{K}{2\Delta f} \right)}{2\pi\Delta f \left(\tau_1 - \frac{K}{2\Delta f} \right)} \cdot h(\tau_1) d\tau_1, \quad (11)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin 2\pi\Delta f \left(\tau_2 - \frac{K+1}{2\Delta f} \right)}{2\pi\Delta f \left(\tau_2 - \frac{K+1}{2\Delta f} \right)} \cdot h(\tau_2) d\tau_2.$$

Из (11) следует, что в (10) произведение $h(\tau_1)h(\tau_2)$ должно давать выражение вида:

$$\delta \left(\tau_1 - \frac{K}{2\pi f} \right) \cdot \delta \left(\tau_2 - \frac{K+1}{2\pi f} \right). \quad (12)$$

Полагая,

$$h(\tau) = \mu\delta(\tau) + (1-\mu)\delta \left(\tau - \frac{1}{2\Delta f} \right), \quad (13)$$

и приняв $K = 0$, после подстановки в (10) легко убедиться, что условие максимума выполняется, а (9) запишется в виде:

$$\langle u_{C \text{ Вых}}^2(t) \rangle = q(1-q)\mu(1-\mu)kT_C^0\Delta f, \quad (14)$$

где μ – весовой коэффициент для входной цепи.

Таким образом, входная цепь радиометрического приёмника должна содержать линейный блок с импульсной характеристикой вида (13). Учтем, что на выходе радиометрического приёмника действует гармоническая помеха, имеющая вид (1), где $U_{\text{ПО}} \neq 0$. Сигнал помехи с учетом [6] и, исходя из условия инвариантности, то есть тождественного равенства сигнала помехи на выходе линейной цепи нулю, будет иметь вид:

$$U_{\text{П Вых}} = U_{\text{ПО}}\mu\cos(2\pi f_{\text{П}}t + \varphi_{\text{П}})U_{\text{ПО}}(1-\mu)\cos \left[2\pi f_{\text{П}} \left(t + \frac{1}{2\Delta f} \right) + \varphi_{\text{П}} \right] = 0,$$

откуда получим необходимые условия $\mu=1-0,5$:

$$2\pi f_{\text{П}}t + \varphi_{\text{П}} + \frac{2\pi f_{\text{П}}}{2\Delta f} - 2\pi ft - \varphi = (2n+1)\pi, \quad (15)$$

после преобразования получим:

$$\frac{1}{2\Delta f} = \tau = \frac{n + \frac{1}{2}}{f_{II}} \quad (16)$$

Таким образом, при условиях (8), (13), (14) синтезированный радиометрический приёмник является инвариантным в среднеквадратическом смысле по отношению к флуктуациям коэффициента усиления и полностью инвариантен по отношению к гармонической помехе.

6. Результаты исследований

В соответствии с полученными выражениями для импульсных характеристик входной цепи (13) и схемы квадратичного детектирования (8), составим структуру синтезированного радиометрического приёмника. Функциональная схема такого приемника будет иметь вид, представленный на рис. 2.

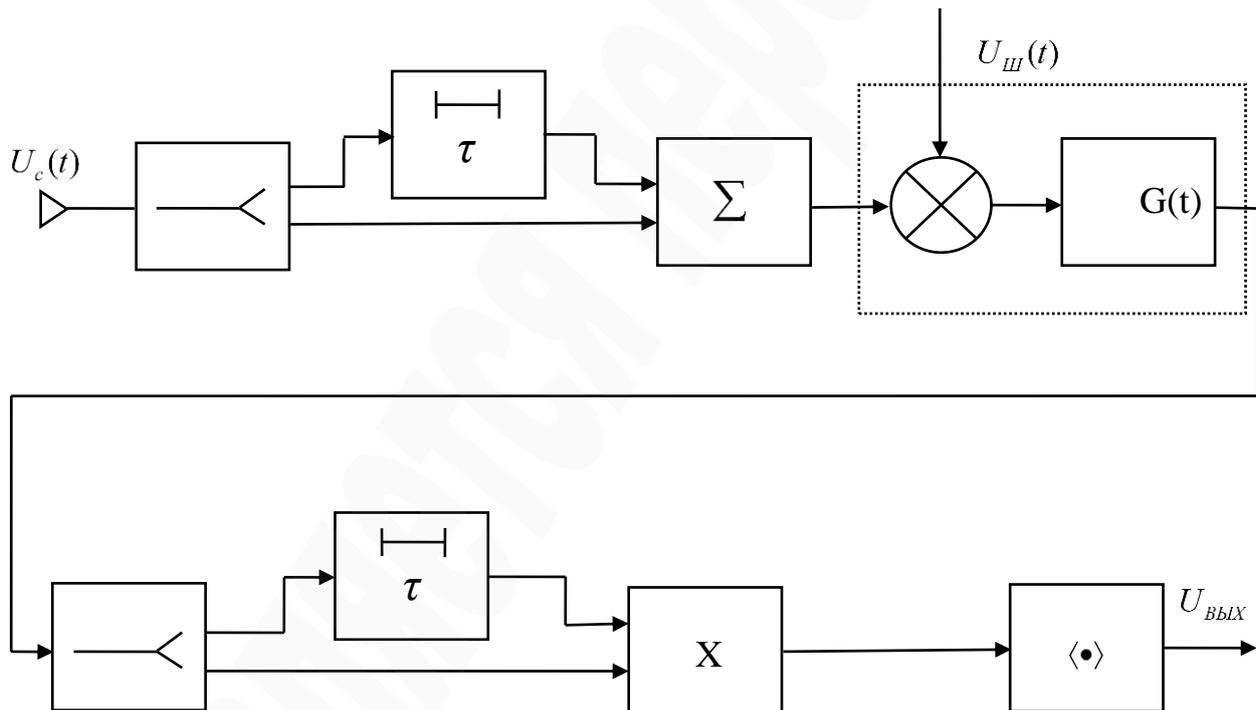


Рис. 2. Функциональная схема синтезированного радиометрического приёмника

В данном радиоприёмнике входной сигнал, поступающий с антенны, во входной цепи делится по мощности на две компоненты, одна из которых задерживается на время τ , а затем эти компоненты складываются в сумматоре. Далее происходит усиление с последующим делением на две компоненты, одна из которых задерживается на то же время τ , а затем эти компоненты перемножаются, а произведение их усредняется. Время задержки в блоках

задержки выбирается большим интервала корреляции, то есть $\tau \gg \frac{1}{2\Delta f}$. Для получения схемы, при достигнутой инвариантности к внутренним шумам и гармонической помехе, с учетом (13) можем записать:

$$u_{\text{ВЫХ}}(q, t) = u_c^2(t) \mu(1-\mu)q(1-q). \quad (17)$$

Определим оптимальные значения коэффициентов μ и q , которые учитывают потери за счет разделения сигналов в первом и втором делителях и зависят от соотношения мощностей на их входах. Для достижения максимума выходного сигнала произведение коэффициентов в (15) должно достичь своего максимума. Из (15) видно, что это будет достигнуто при $\mu=q=0,5$.

$$q_{\text{ВЫХ} \text{ xc}} = \left(\frac{P_c}{P_{\text{III}}} \right) = \frac{u_c^2 \text{ ВЫХ}(t)}{\sigma_{\text{СК}}} = \frac{u_c^2 \text{ ВЫХ}(t) 4\sqrt{2}}{\sqrt{u_{\text{III}}^4(t)}} \times \quad (18)$$

$$\times \sqrt{\frac{\Delta f}{\Delta F}} = \frac{4\sqrt{2}}{16} \cdot \frac{kT_c^0 \Delta f}{kT_{\text{III}}^0 \Delta f} \cdot \sqrt{\frac{\Delta f}{\Delta F}} = \frac{1}{2\sqrt{2}} \cdot \frac{T_c^0}{T_{\text{III}}^0} \sqrt{\frac{\Delta f}{\Delta F}}.$$

Из полученного выражения следует, что реальная чувствительность синтезированного радиометрического приёмника из-за отсутствия влияния флуктуации коэффициента усиления будет значительно превосходить реальную чувствительность компенсационного радиометрического приёмника.

7. SWOT-анализ результатов исследований

Strengths. Для устранения недостатков, присущих контактному способу измерения температуры животных, следует применять дистанционные методы, основанные на измерении электромагнитного излучения тканей и органов животных. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили создать радиометрический приёмник с параметрами:

- частота – 30...40 ГГц;
- чувствительность измерений – 10^{-17} Вт;
- точность определения температуры внутренних тканей – $\pm 0,1$ °С;
- глубина обнаружения температурных аномалий – 2–5 см;
- быстрое действие измерения – 2–4 с.

Созданный радиометрический приёмник в миллиметровом диапазоне превосходить приёмники в дециметровом и сантиметровом диапазонах по многим параметрам на порядок. К таким параметрам относятся: чувствительность измерений; точность определения температуры внутренних тканей; быстрое действие измерения. Полученное преимущество связано с тем, что в приёмнике была устранена зависимость измерений от флуктуаций коэффициента усиления и действия узкополосной помехи.

Weaknesses. Недостатком приёмника является то, что он требует доработки

по защите от промышленных и широкополосных помех.

Opportunities. Практическая проверка радиометрического приёмника показала возможность отображения температуры внутренних тканей, получение наглядной картины теплового поля, что дает возможность ветеринару установить правильный диагноз.

Применение радиометрического приёмника для диагностики состояния животных:

– позволил при лечении животных уменьшить расход лекарственных средств на 15...20 %;

– разработать рацион кормления и условия содержания животных и, как итог, повысить продуктивность на 20...25 %;

– сэкономить хозяйству (1000 голов коров) 5000...6000 дол. США.

Threats. Стоимость доработки приемника по защите от промышленных и широкополосных помех будет составлять примерно 10 % от стоимости радиометрического приёмника.

8. Выводы

1. Обоснована обобщённая схема радиоприёмника. Особенность этой схемы заключается в том, что она включает устройства квадратичного детектирования и усреднения.

2. Получено выражение для импульсной характеристики входной цепи и квадратичного детектора без узкополосной помехи гармонического типа. Характер импульсной характеристики необходим для того, чтобы усреднённое значение выходного сигнала было инвариантным к флуктуациям коэффициента усиления.

3. Получено выражение для импульсной характеристики входной цепи и квадратичного детектора с узкополосной помехой. Импульсная характеристика входной цепи с узкополосной помехой необходима для определения схемы квадратичного детектора.

4. Обоснована схема синтезированного радиоприёмника, который является инвариантным по отношению к флуктуациям коэффициента усиления и полностью инвариантным по отношению к узкополосной помехи гармонического типа. Особенность этой схемы заключается в том, что в данном радиоприёмнике входной сигнал, поступающий с антенны, во входной цепи делится по мощности на две компоненты, одна из которых задерживается на время τ , а затем эти компоненты складываются в сумматоре. Далее происходит усиление с последующим делением на две компоненты, одна из которых задерживается на то же время τ , а затем эти компоненты перемножаются, а произведение их усредняется.

Литература

1. Malkmus-Opperman. Osnovy klinicheskoy diagnostiki vnutrennikh bolezney domashnikh zhivotnykh. Moscow-Leningrad: GIZ, 1990. 436 p.

2. Cherenkov A. D., Avrunin O. G. Primenenie nizkoenergeticheskikh EMP dlya upravlyayushhego vozdeystviya na biofizicheskie protsessy v biologicheskikh

ob'iektakh // Energoberezhnie. Energetika. Energoaudit. 2014. Vol. 8 (126). P. 62–66.

3. Theoretical Analysis of Electromagnetic Field Electric Tension Distribution in the Seeds of Cereals / Konstantinov I. S. et al. // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. 2015. Vol. 6, No. 6. P. 1686–1694.

4. Elektricheskie izmereniya elektricheskikh i neelektricheskikh velichin / ed. by Polishhuk E. S. Kyiv: Vishha shkola, 1984. 359 p.

5. Esepkina N. A., Korolkov D. V. Radioteleskopy i radiometry. Moscow: Nauka, 2009. 116 p.

6. Ioshenko A. N. Noise interference of broadband communication systems with various methods of suppressing the spectrum-concentrated interference // Works of Educational Communication Institutes. 2009. Vol. 55. P. 19–30.

7. DuBois P. R., Williams D. J. Increased incidence of retained placenta associated with heat stress in dairy cows // Theriogenology. 1980. Vol. 13, No. 2. P. 115–121. doi:[10.1016/0093-691x\(80\)90120-x](https://doi.org/10.1016/0093-691x(80)90120-x)

8. Lomba F. Aspects du syndrome part dans cinq grandes exploitations baines. Frequence et repercussions // Ann. Med. Veter. 2009. Vol. 24, No. 18. P. 577–584.

9. Ash C. J., Cook J. R., Auner C. R. The use of rectal temperature to monitor heat stroke // Missouri Medicine. 2009. Vol. 89, No. 5. P. 283–291.

10. Ogren J. M. The Inaccuracy of Axillary Temperatures Measured With an Electronic Thermometer // Archives of Pediatrics & Adolescent Medicine. 1990. Vol. 144, No. 1. P. 109–111. doi:[10.1001/archpedi.1990.02150250121048](https://doi.org/10.1001/archpedi.1990.02150250121048)

11. Van Lamsweerde-Gallez D., Meessen A. The role of proteins in a dipole model for steady-state ionic transport through biological membranes // The Journal of Membrane Biology. 1975. Vol. 23, No. 1. P. 103–137. doi:[10.1007/bf01870247](https://doi.org/10.1007/bf01870247)

12. Maldague X. Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing. New York: Wiley, 2001. 684 p.

13. Jones B. F. A reappraisal of the use of infrared thermal image analysis in medicine // IEEE Transactions on Medical Imaging. 1998. Vol. 17, No. 6. P. 1019–1027. doi:[10.1109/42.746635](https://doi.org/10.1109/42.746635)

14. Zheng L., Tidrow M. Analyses of infrared focal plane array figure of merit and its impact on sensor system trades // Infrared Physics & Technology. 2009. Vol. 52, No. 6. P. 408–411. doi:[10.1016/j.infrared.2009.08.001](https://doi.org/10.1016/j.infrared.2009.08.001)

15. Ring E. F. J., Ammer K. The Technique of Infra red Imaging in Medicine // Thermology International. 2000. Vol. 10, No. 1. P. 7–14.

16. Poradish F. J., Habbe J. M. Millimeter Wave Radiometric Imaging // Proc. SPIE 0337, Millimeter Wave Technology I. 1982. doi:[10.1117/12.965939](https://doi.org/10.1117/12.965939)

17. Skou, N. Microwave Radiometer Systems: Design and Analysis. Boston-London: Artech House, 1989. 162 p.