

ПРОБЛЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ НИЗКОИНТЕНСИВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

Ю.А. СКРИПНИК, А.Ф. ЯНЕНКО

Государственная академия легкой промышленности Украины, НИЦ КМ “Видгук” МЗ Украины

Активное освоение и использование миллиметровых (ММ) волн от 1 до 10 мм (частотой 30–300 ГГц) в радиосвязи и радионавигации, радиоастрономии и метеорологии, физике и медицине, в других областях науки и техники тесно связано с проблемой измерения электрических параметров информационных сигналов — частоты и мощности, ослабления и фазового сдвига, коэффициента стоячей волны и шума.

Процедуры измерения в этом диапазоне осложняются отсутствием необходимой стандартной аппаратуры или ограничением пределов измерения имеющихся приборов.

Измерение мощности в ММ-диапазоне можно выполнять с использованием стандартных измерителей мощности МЗ-22А и МЗ-64, однако возможности этих измерителей, в области малых значений мощности ограничиваются пределом в 1 мкВт (1×10^{-6} Вт). В то же время в радиоастрономии, радиолокации, медицине на частотах > 30 ГГц имеются задачи по измерению мощностей, значения которых на несколько порядков меньше значений достижимых стандартными измерительными приборами.

Так, например, аппаратура для микроволновой резонансной терапии обеспечивает выходной уровень монохроматических сигналов от 1×10^{-6} до 1×10^{-12} Вт, а шумовых сигналов от 1×10^{-12} до 1×10^{-18} Вт/Гц, что оказывает нетепловое информационное воздействие [1]. Для выполнения исследований отклика живого организма уровень измеряемой флуктуационной мощности должен быть еще меньше — 1×10^{-20} Вт/Гц [2]. Измерение таких низкоинтенсивных излучений можно проводить только с использованием нестандартизованных специальных средств измерений (установок), базовым блоком которых является высочувствительный измерительный приемник — радиометр.

Предельная чувствительность такого измерительного приемника определяется выражением [3]

$$P_{\text{прк пред}} \kappa t_0 \Delta f K_{\text{ш}} = 4 \times 10^{-21} \Delta f K_{\text{ш}}, \quad (1)$$

где κ — постоянная Больцмана — 1.37×10^{-23} дж/град., T_0 — абсолютная температура окружающей среды — 290°К, Δf — полоса пропускания приемника, $K_{\text{ш}}$ — коэффициент шума тракта приемника.

Таким образом, предельная чувствительность пропорциональна коэффициенту шума и полосе пропускания измерительного приемника. Проектирование измерительных приемников, а на их основе и создание измерительных установок, возможно с использованием компенсационных, модуляционных или корреляционных методов [4].

Теоретически наибольшую чувствительность могут обеспечить компенсационные методы, однако, из-за сложности компенсации собственных флуктуаций коэффициента усиления тракта это преимущество не всегда реализуемо. Устройства на основе этого метода называются компенсационными радиометрами. Чувствительность компенсационного радиометра определяется как [4]

$$\Delta P_{\text{КМП}} = 1.41 P_{\text{ш}} \sqrt{\frac{\Delta F}{\Delta f}} \quad (2)$$

где $P_{\text{ш}}$ - мощность шума приемного канала радиометра, ΔF — полоса пропускания фильтра на выходе квадратичного детектора, Δf — полоса пропускания усилителя промежуточной частоты и квадратичного детектора.

Перспективным при измерении мощности шумовых сигналов является использование корреляционных методов. Метод реализуется с помощью корреляционного радиометра, упрощенная схема которого приведена на рис. 1. Радиометр состоит из двух идентичных каналов, в каждом из которых включены приемная антенна (X_1, X_2), усилитель высокой частоты (A_1, A_2), гетеродин (G_1, G_2), преобразователь частоты (U_1, U_2) и усилитель промежуточной частоты (A_3, A_4). Выходы каналов радиометра подсоединены к перемножителю U_3 и через полосовой фильтр Z_1 , квадратичный детектор U_4 , фильтр нижних частот Z_2 подключены к индикаторному (регистрирующему) устройству A_5 .

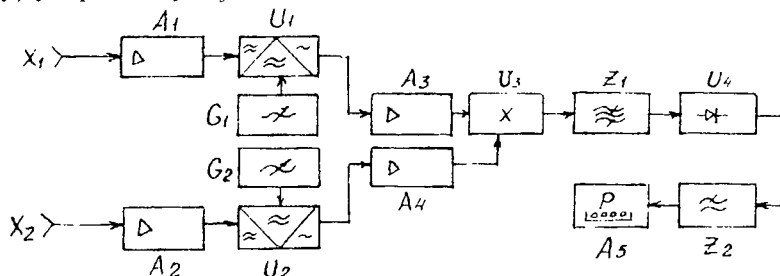


Рис. 1

В отсутствие сигнала на выходе корреляционного радиометра выделяется мощность собственных шумов, имеющая знакопеременный характер

$$P_{\text{КРП}} = \int S_{\text{ш1}}(f) S_{\text{ш2}}(f) df,$$

где $S_{\text{ш1}}, S_{\text{ш2}}$ — шумы соответствующих каналов коррелометра.

Подключение на входы коррелометра исследуемого сигнала $X(t)$ приводит к появлению на выходе квадратичного детектора сигнала, пропорционального мощности шумов и исследуемого сигнала

$$P_{\text{КРП2}} = \int S_{\text{ш1}}(f) S_{\text{ш2}}(f) df + \int X^2(f) df \quad (2)$$

Вторая составляющая уравнения (2) смещает результирующий сигнал в область положительных значений, что фиксируется регистрирующим устройством коррелометра. Чувствительность корреляционного радиометра определяется как [4]

$$\Delta P_{КРЛ} = 2P_{ш} \sqrt{\frac{\Delta F}{\Delta f}} \tag{3}$$

Коррелометры обеспечивают меньшую чувствительность, чем компенсационные радиометры в $\Delta P_{КРЛ} / \Delta P_{КМЛ} = 1.41$ раза.

В измерительной технике для измерения различных величин широко применяются модуляционные методы [5]. Весьма перспективно использование этих методов в области СВЧ и КВЧ для измерения мощности низкоинтенсивного излучения. Схема модуляционного радиометра представлена на рис. 2.

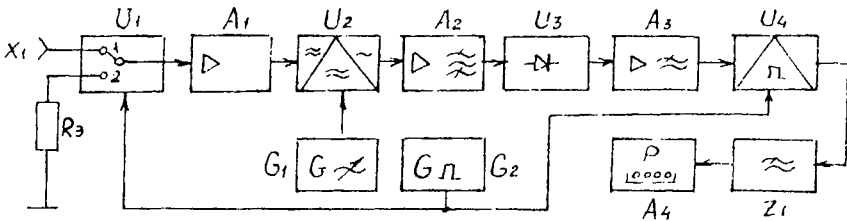


Рис. 2

Модуляционный радиометр построен по одноканальной последовательной схеме, содержащей входную антенну X_1 , эквивалент антенны R_3 , коммутационный модулятор U_1 , усилитель A_1 , преобразователь частоты U_2 , гетеродин G_1 , усилитель промежуточной частоты A_2 , квадратичный детектор U_3 , низкочастотный усилитель A_3 , синхронный детектор U_4 , генератор коммутирующих импульсов G_2 , фильтр нижних частот Z_1 и индикатор A_4 .

Сигнал с выхода антенны, например, вида

$$u_c(t) = U_c \sin \omega t,$$

поступает на коммутационный модулятор U_1 , переключаемый с частотой $\Omega < \omega$, на выходе которого формируется напряжение

$$u_c(t) = U_c (1 + m \text{sign} \sin \Omega t) \sin \omega t,$$

где m — коэффициент глубины амплитудной модуляции.

Учитывая, что приемник имеет собственные шумы, за период коммутации на выходе квадратичного детектора получим

$$\begin{aligned} I'_{квд} &= \beta [S_{ш}^2(t) + u_c^2(t)], & 0 < t < \pi/\Omega, \\ I''_{квд} &= \beta S_{ш}^2(t), & 0 < t < \pi/2\Omega, \end{aligned}$$

где β — коэффициент преобразования квадратичного детектора.

Переменная составляющая выходного напряжения квадратичного детектора имеет вид $U \sim_{\text{КВД}} = \beta/2 \cdot (I'_{\text{КВД}} - I''_{\text{КВД}}) = \beta U_c^2 / 2 \text{sign} \sin \Omega t + S_{\text{ш КВД}}^2(t)$.

В синхронном детекторе происходит демодуляция путем умножения полученного сигнала на опорное модулирующее напряжение. В результате фильтром нижних частот выделяется постоянная составляющая, пропорциональная мощности исследуемого сигнала

$$P_c = \frac{\alpha}{2} \times \left(\frac{\beta U_c^2}{2} + S_{\text{ш КВД}}^2 \right),$$

где α — коэффициент преобразования синхронного детектора.

Чувствительность модуляционного радиометра определяется из [4]

$$\Delta P_{\text{МДЛ}} = 2\sqrt{2}P_{\text{ш}} \sqrt{\frac{\Delta F}{\Delta f}}$$

Чувствительность модуляционного радиометра в 2 раза хуже чем компенсационного и в 1.41 раза чем корреляционного, однако, простота реализации модуляционных схем, надежность в работе определяют широкое их использование при измерении мощности низкоинтенсивных излучений СВЧ и КВЧ диапазонов. Так, например, измерительные приемники П5-14А и П5-15А, работающие в диапазоне частот 16–27 ГГц и 27–37 ГГц и обеспечивающие максимальную чувствительность 1×10^{-12} Вт, выполнены с использованием модуляционного преобразования входного сигнала.

Результаты анализа, приведенных выше соотношений предельной чувствительности различных схем радиометров показаны на рис. 3 и рис. 4.

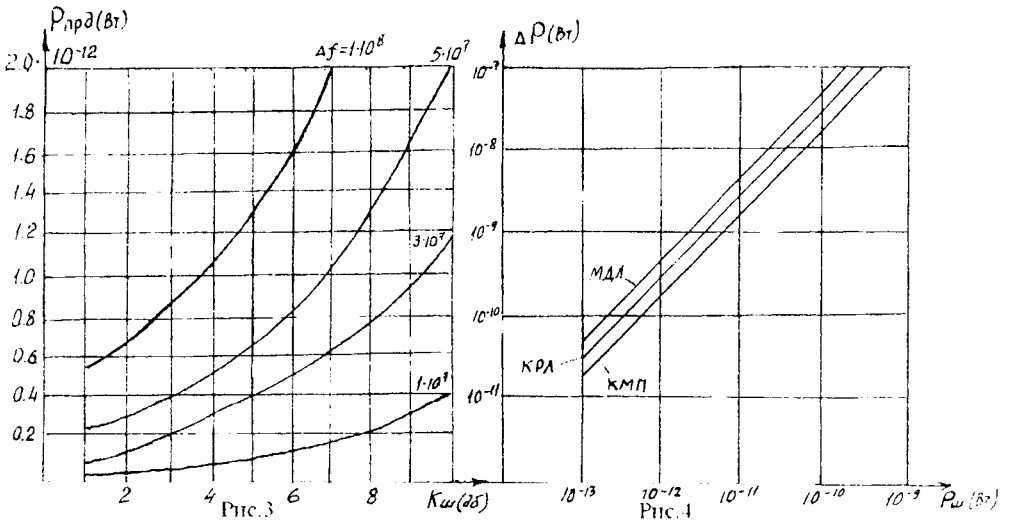


Рис. 3

Рис. 4

Используя полученные графики, можно осуществить выбор варианта схемы и параметров тракта измерительного приемника, а также оценить возможности намеченного технического решения при его практической реализации.

Как видно из рис. 4, компенсационные и корреляционные схемы радиометров обладают большей чувствительностью, при том же уровне шума, однако практическая реализация этих технических решений не обеспечивает прогнозируемое преимущество из-за сложности компенсации собственных шумов и изменения коэффициента передачи, наличия связей через общий блок питания, отдельные узлы или каналы в коррелометре. Поэтому с точки зрения практической реализации наиболее предпочтительной является схема с коммутационно-модуляционным преобразованием входного сигнала.

Нами была разработана нестандартизованная измерительная установка для измерения мощности низкоинтенсивного излучения ММ-диапазона с использованием коммутационно — модуляционного преобразования частоты входного сигнала.

Установка аттестована и обеспечивает следующие метрологические характеристики:

1. Диапазон рабочих частот составляет от 53.5 до 64.5 ГГц, с возможностью расширения до 78.3 ГГц.

2. Диапазон измеряемых мощностей монохроматических сигналов от 1×10^{-2} Вт. до $1 \times 10^{-12(-13)}$ Вт.

3. Диапазон измерения спектральной плотности мощности шума от 1×10^{-10} Вт/Гц до $1 \times 10^{-18(-19)}$ Вт/Гц с возможностью в отдельных участках диапазона 1×10^{-20} Вт/Гц.

4. Погрешность измерения интегральной мощности монохроматических сигналов и спектральной плотности мощности шумовых сигналов не более $\pm 40\%$.

Авторы признательны проф. Ситько С.П. за участие в обсуждении материалов данной статьи, высказанные замечания и предложения по ее улучшению.

ЛИТЕРАТУРА

1. С.П. Ситько, Л.Н. Мкртчян Введение в квантовую медицину- Киев: Паттерн. 1994.
2. Н.Д. Девятков, М.Б. Голант, О.В. Бецкий Миллиметровые волны и их роль в процессах жизнедеятельности — Москва: Радио и связь 1991.
3. А.В. Безруков Измерение шумов радиоприемных устройств-М: Связь, 1971.
4. Н.А. Есепкина, Д.В. Корольков, Ю.Н. Парийский Радиотелескопы и радиометры- Москва.: Наука, 1972.
5. Ю.А. Скрипник Измерительные устройства с коммутационно-модуляционными преобразователями — Киев: Выща школа, 1975.