

**И. М. Мыценко, Д. Д. Халамейда***Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины**12, ул. Акад. Проскуры, Харьков, 61085, Украина*E-mail: [khalameyda@ire.kharkov.ua](mailto:khalameyda@ire.kharkov.ua)**ПОСТРОЕНИЕ РАДИОМЕТРОВ МИЛЛИМЕТРОВОГО И САНТИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНОВ НА ОСНОВЕ КОНВЕРТОРОВ СПУТНИКОВОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ**

Рассмотрены особенности построения радиометров миллиметрового и сантиметрового диапазонов на основе конверторов спутникового телевидения. Представлены рабочие характеристики макета радиометра сантиметрового диапазона на основе конвертора спутникового телевидения. Предложен метод его калибровки. Результаты экспериментальных исследований сопоставлены с известными данными. Рассмотрена возможность применения конвертора спутникового телевидения в качестве высоко-частотного тракта промежуточной частоты радиометров миллиметрового диапазона, а также двухдиапазонного – миллиметрового и сантиметрового диапазонов. Сделаны выводы о целесообразности применения конверторов спутникового телевидения для построения радиометров и других приемных устройств. Ил. 12. Табл. 1. Библиогр.: 8 назв.

**Ключевые слова:** радиометр, спутниковый конвертор.

Сформировавшиеся к настоящему времени методы дистанционного зондирования атмосферы основаны на использовании радиотехнических принципов локации, которые можно разделить на два основных вида: активные и пассивные. Возрастающие требования к количеству и качеству получаемой информации требуют создания более современных систем, которые позволят решить новые задачи и обеспечить повышение точности измерений [1]. К радиолокационным станциям (РЛС) нового типа относятся совмещенные системы, позволяющие взаимно компенсировать недостатки, присущие каждой из систем в отдельности, и дополнить друг друга. Совмещенные пассивно-активные (ПА) РЛС позволяют получить информацию о водозапасе и водности облаков на различных стадиях развития, обнаруживать опасные метеорологические явления. Пассивная радиолокация основана на приеме собственного радиотеплового излучения атмосферы с помощью приемников. Метеообъекты, температура которых отлична от абсолютного нуля, излучают электромагнитные волны в широком диапазоне частот. Впервые радиотеплолокатор был применен Р. Дике для измерения радиотеплового излучения атмосферы [2]. В последующие годы развивалась теория и практика СВЧ-радиометрии.

В настоящее время возникла необходимость в высокочувствительных радиометрах, что вызвано принципиально новыми задачами в изучении опасных метеорологических явлений, связанных с облаками (гроза, град, ливень и т. д.).

Основным параметром радиометра является его чувствительность, под которой подразумевается значение антенной температуры  $T_a$ , при которой выходное соотношение сигнал/шум  $q_{\text{вых}}$  и чувствительность радиометра  $\delta T$  связаны между собой соотношением

$$\delta T = \frac{T_a}{\sqrt{q_{\text{вых}}}}. \quad (1)$$

Для оптимального приемника

$$\delta T_0 = \frac{T_{\text{ш}}}{\sqrt{\Delta f t_c}}, \quad (2)$$

где  $\delta T_0$  – потенциальная чувствительность;  $T_{\text{ш}}$  – шумовая температура.

Реальный радиометр при известных параметрах ( $\Delta f$  – полоса пропускания,  $t_c$  – длительность сигнала и  $T_{\text{ш}}$  – шумовая температура), не может иметь более высокую чувствительность.

Для возможности сравнения радиометров используется нормированная чувствительность  $\delta T_n$ , которая представляет собой чувствительность, отнесенную к длительности сигнала, равной 1 с

$$\delta T_n = \delta T \sqrt{t_c}. \quad (3)$$

Нормированная потенциальная чувствительность равна

$$\delta T_{n0} = \frac{T_{\text{ш}}}{\sqrt{\Delta f}}. \quad (4)$$

Кроме этого, используется понятие качества радиометра

$$Q = \frac{T_c}{\delta T_{n0}} = \frac{\sqrt{\Delta f}}{\text{Ш}}, \quad (5)$$

где  $T_c = 290$  К – стандартная температура; Ш – коэффициент шума радиометра.

Из соотношения (4) видно, что минимально обнаруживаемый сигнал прямо пропорционален шумовой температуре приемника и обратно пропорционален корню квадратному из полосы пропускания по высокой частоте. Поэтому наилучшим входным устройством радиометра будет приемное устройство с малой шумовой температурой и большой полосой пропускания. Кроме этого, оно должно обладать достаточно большим коэффициентом усиления по мощности,

что позволяет уменьшить влияние шумов низко-частотной части приемника.

Широкое применение спутникового теле-вещания, простота и доступность аппаратуры, используемые частотные диапазоны и экологиче-ская безопасность поставили задачу исследовать возможность использования сигналов геостацио-нарного искусственного спутника Земли (ИСЗ) для радиолокационных задач [3]. В частности, большой интерес представляет конвертор спут-никового телевидения, который сочетает в себе дешевизну и хорошие технические характе-ристики: у конверторов *Ku*-диапазона значение коэф-фициента шума  $\Pi \leq 0,5$  дБ является обычным для радиометров. Как известно [4], одним из основ-ных параметров радиометров является коэффициент шума. Данная статья посвящена вопросам применения конвертора спутникового телевиде-ния в качестве приемного узла радиометра и ре-ализации его шумовых и других технических ха-рактеристик.

**1. Построение радиометров компенса-ционного типа на основе конверторов милли-метрового или сантиметрового диапазонов.** В настоящее время существует множество произ-водителей конверторов спутникового телевиде-ния сантиметрового и миллиметрового диапазо-нов. На рис. 1 показана функциональная схема конвертора, нашедшего широкое применение [5]. На входе конвертора применяются два идентич-ных малошумящих усилителя (МШУ) МШУ-1 и МШУ-2, которые используются для приема сигналов *V*- и *H*-поляризации и имеют электрон-ное переключение изменения напряжения пита-ния 13/18 В [5]. Оба усилителя работают пооче-редно на общую нагрузку – полосопропускной фильтр (ППФ) в диапазоне частот 10,7...12,7 ГГц. Общее усиление  $K_p$  конвертора составляет 55...60 дБ. Предварительный усилитель проме-жуточной частоты (ПУПЧ) служит для усиления сигнала промежуточной частоты в полосе 0,9...2,0 ГГц.

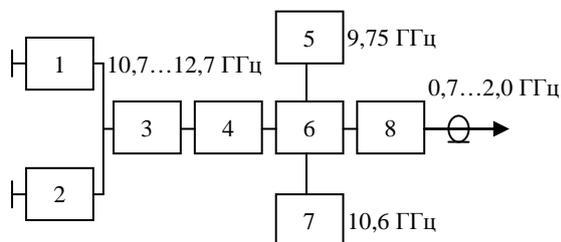


Рис. 1. Функциональная схема конвертора спутникового теле-видения сантиметрового диапазона: 1 – МШУ вертикальной поляризации; 2 – МШУ горизонтальной поляризации; 3 – МШУ сигналов вертикальной и горизонтальной поляризации; 4 – ППФ; 5 – гетеродин НЧ; 6 – смеситель; 7 – гетеродин ВЧ; 8 – ПУПЧ

Основное назначение ППФ – ослабление зеркального канала и уменьшение паразитного излучения гетеродина. В радиометре этот фильтр определяет полосу пропускания как при измере-ниях, так и при калибровке. Далее сигнал посту-пает на преобразователь, состоящий из транзис-торного смесителя (СМ) и гетеродина. Как из-вестно, все диодные смесители имеют потери преобразования –8...–10 дБ. По шумовым пара-метрам смесители на полевых транзисторах Шоттки несколько хуже, чем на диодах, однако они преобразуют сигнал с усилением 3...10 дБ. Это позволяет снизить требования к коэффициен-ту шума и коэффициенту усиления ПУПЧ-конвертора. Для стабилизации частоты гетеродина применяется диэлектрический резонатор на осно-ве титаната кальция и алюмината лантана, имею-щий отверстие вдоль оси резонатора. Это позво-ляет получить более «чистый» спектр сигнала гетеродина и низкий фазовый шум. Основные па-раметры современных конверторов приведены в таблице.

Параметр	<i>Ku-band</i>	<i>Ka-band</i>
Коэффициент шума, дБ	0,3...0,5	1,3...3,0
Коэффициент усиления, дБ	50...65	50...65
Абсолютная нестабильность частоты гетеродина, кГц	5...5 000	10...5 000
Фазовый шум гетеродина, дБ/Гц	50 – при смещении на 1 кГц, 75 – при смещении на 10 кГц, 95 – при смещении на 100 кГц	
Диапазон частот, ГГц	10,7...12,75	17,7...22,2

Существует ряд типов радиометров (компенсационный, модуляционный, корреляци-онный, нулевой и др.) [4], каждый из которых имеет свои преимущества, определяющие воз-можности применения.

Компенсационный радиометр является наиболее простым типом, имеющим высокий ко-эффициент использования энергии входного сиг-нала. Главный недостаток компенсационного радиометра – относительно большая подвержен-ность влиянию аномальных флуктуаций, что ве-дет к потере реальной чувствительности. С уче-том того, что малошумящие усилители на входе спутникового конвертора имеют очень малый коэффициент шума (~0,3 дБ в сантиметровом и ~2 дБ в миллиметровом диапазоне), а сам конвер-тор обладает высокой стабильностью коэффи-циента усиления, в применении модуляционной схемы нет необходимости.

Функциональная схема компенсационного радиометра с использованием спутникового конвертора миллиметрового или сантиметрового диапазонов приведена на рис. 2.

Дополнительное усиление сигнала осуществляется широкополосным услителем (ШУ) с эквивалентной полосой шире, чем у ПУПЧ. Далее сигнал детектируется квадратичным амплитудным детектором (АД) и фильтруется фильтром низкой частоты (ФНЧ) и подается на неинвертирующий вход усилителя постоянного тока (УПТ). Компенсация постоянной составляющей выходного напряжения, обусловленной собственным шумом приемника, производится с помощью операционного усилителя УПТ. Для этой цели уровень сигнала, равный среднему значению собственных шумов приемника, подается на инвертирующий вход операционного усилителя УПТ, где производится его вычитание.

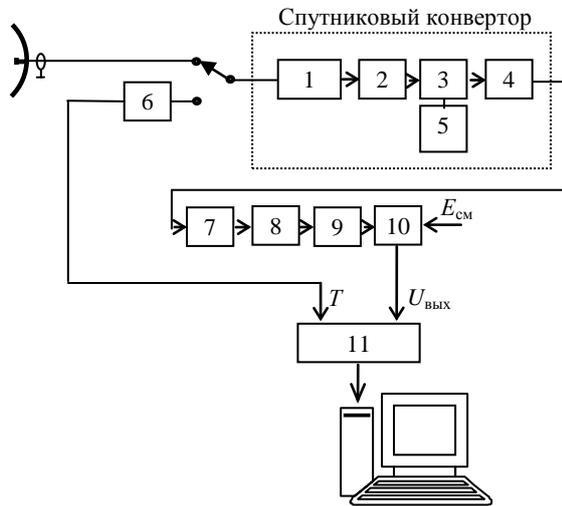


Рис. 2. Функциональная схема радиометра компенсационного типа на основе конверторов миллиметрового или сантиметрового диапазонов: 1 – МШУ; 2 – ППФ; 3 – СМ; 4 – ПУПЧ; 5 – гетеродин; 6 – согласованная нагрузка; 7 – широкополосный усилитель; 8 – амплитудный детектор; 9 – ФНЧ; 10 – УПТ; 11 – аналогово-цифровой преобразователь (АЦП)

Для проверки работоспособности и определения рабочих характеристик был разработан и изготовлен макет компенсационного радиометра в соответствии с функциональной схемой (рис. 2) [6, 7]. Внешний блок макета радиометра, состоящий из рупорной антенны, переключателя, перехода с прямоугольного волновода на круглый, конвертора и согласованной нагрузки, показан рис. 3.

Как известно [4], тепловое излучение атмосферы обусловлено наличием в плотных слоях водяных паров и кислорода. Значительное излучение создают также гидрометеорообразования. Поэтому совершенно очевидно, что интенсивность излучения атмосферы должна возрастать

при изменении угла визирования от зенитного и по направлению к горизонту. При приближении линии визирования к горизонту увеличивается длина участка, который проходит через плотные слои атмосферы.



Рис. 3. Внешний блок макета радиометра

Градуировка радиометра производилась с помощью аттенюатора и генератора шума (ГШ) со спектральной плотностью шума, равной  $33 kT$  Вт/Гц. Сигнал ГШ подавался на вход приемника с помощью направленного ответвителя ( $L = 6$  дБ), а рупорная антенна радиометра была направлена на «чистое» небо под углом места  $\theta = 70^\circ$ . На функциональной схеме (рис. 2) эти узлы не показаны.

На рис. 4 представлена амплитудная характеристика макета радиометра, которая имеет линейную зависимость между входной мощностью и выходным напряжением.

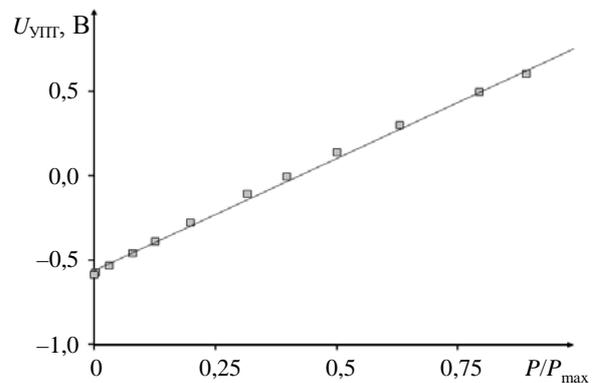


Рис. 4. Амплитудная характеристика макета радиометра

На рис. 5 показана экспериментальная зависимость выходного напряжения макета радиометра от угла визирования. Как видно из рисунка, при углах визирования, близких к горизонтальному, значение уровня шумов приближается к уровню абсолютно черного тела (АЧТ), когда ко входу радиометра с помощью переключателя подсоединялась согласованная нагрузка. Это говорит о том, что в диаграмму направленности антенны начинает попадать земная поверхность.

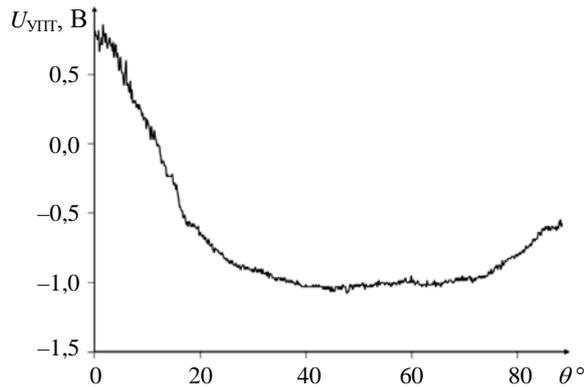


Рис. 5. График зависимости выходного напряжения макета радиометра от угла визирования

При увеличении угла визирования влияние отражений от земной поверхности уменьшается и практически исчезает, а сама зависимость  $U_{\text{вых}} = f(\theta)$  в диапазоне углов  $5...50^\circ$  повторяет зависимости, представленные в работах [4, 8]. При дальнейшем увеличении угла визирования уровень шумов начинает возрастать. Это связано с тем, что начинают влиять отражения от стены лаборатории, к которой прикреплен макет радиометра. Условия и возможности проведения эксперимента не позволили установить радиометр в другом месте, где влияние отражений отсутствует. Полученные зависимости (рис. 4, 5) говорят о том, что макет радиометра функционирует и работоспособен.

**2. Калибровка радиометра.** Наиболее сложным и обязательным действием при радиометрии является калибровка. Для этой цели применяется источник шумового сигнала сравнения.

В радиометрах величина шумовой температуры источника сигнала сравнения выбирается близкой к шумовой температуре антенны  $T_a$ . В качестве источника сигнала может применяться согласованная поглощающая нагрузка при определенной температуре. В дециметровом диапазоне в качестве источника сигнала сравнения могут применяться шумовые диоды, работающие в режиме насыщения, а также стандартные полупроводниковые ГШ. В сантиметровом применяются газоразрядные трубки, шумовая температура которых зависит от газа и слабо зависит от тока и температуры колбы. Шумовая температура таких трубок составляет  $10...12\ 000$  К. Кроме этого, в качестве источника сигнала в сантиметровом диапазоне применяются стандартные полупроводниковые ГШ с типовой спектральной плотностью мощности шума  $30...35$  дБ. Необходимость понижения величины шумовой температуры описанных выше источников сигнала сравнения с помощью аттенуаторов с большим затуханием приводит к снижению предельной чувствительности радиометров за счет ошибки в опре-

делении температуры сравнения. Поэтому целесообразно использовать источники сигнала сравнения с малыми значениями шумовых температур. В литературе [4, 6] описан метод «холодного неба», в котором источником сигнала сравнения является широкоугольная рупорная антенна, направленная на «холодные» участки неба ( $10...20$  К). Недостатком этого метода является зависимость сигнала сравнения от тропосферных условий, облачности и положения антенны.

В другом методе, который является наиболее предпочтительным для калибровки радиометров, применяется охлаждаемая поглощающая нагрузка, излучающая как АЧТ. Температура излучения зависит от степени охлаждения: при охлаждении жидким гелием шумовая температура нагрузки может составлять  $T_{\text{ш}} \approx 4...5$  К, или  $300$  К при температуре окружающей среды [4].

Осуществление калибровки приемника радиометров описанными выше методами затруднительно, а иногда и невозможно. По этой причине в данной работе излагается метод калибровки с использованием одного из малошумящих усилителей на входе конвертора спутникового телевидения в качестве источника сигнала сравнения с малой шумовой температурой ( $\sim 15$  К). В общем случае, когда амплитудно-частотная характеристика усилителя не является прямоугольной, выражение для мощности шумов на выходе усилителя имеет вид

$$P_{\text{ш}} = \int_0^{\infty} kTK_p(f)\Delta f, \quad (6)$$

где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Вт/Гц – постоянная Больцмана;  $K_p$  – коэффициент усиления по мощности.

Конвертор спутникового телевидения обладает амплитудно-частотной характеристикой, близкой к прямоугольной. Поэтому можно воспользоваться более простым выражением

$$P_{\text{ш}} = kT\Delta f K_p. \quad (7)$$

Отношение сигнал/шум на выходе приемной системы всегда хуже, чем на ее входе при данной полосе пропускания. Это связано с наличием собственных шумов радиоприемника. Величина, которая показывает во сколько раз изменяется отношение мощности сигнала и шума при переходе от входа к выходу приемника, называется коэффициентом шума (Ш). Реальная мощность шумов на выходе приемного устройства равна

$$P_{\text{ш}} = kT\Delta f K_p \text{Ш}. \quad (8)$$

В линейных системах, для которых справедлив принцип суперпозиции, можно получить следующее выражение для выходной мощности шумов:

$$P_{\text{ш}}^{\text{вых}} = kT\Delta f K_p + P_{\text{ш}}^{\text{соб}}, \quad (9)$$

где  $P_{\text{шсоб}}$  – собственные шумы приемного устройства, которые оно добавляет к шумам источника, определяемые его внутренним сопротивлением при температуре  $T$ .

Для сравнения шумовых характеристик различных радиотехнических систем условилось считать, что сопротивление источника сигнала всегда находится при определенной температуре, называемой стандартной шумовой температурой  $T_0$  и равной 290 К, т. е. в соотношениях (6) и (7)  $T = T_0 = 290$  К.

Коэффициент шума однозначно связан с эквивалентной шумовой температурой [4]

$$T_{\text{ш}} = T_0(\text{Ш} - 1). \quad (10)$$

Таким образом, выходная мощность шумов приемного устройства радиометра будет состоять из двух составляющих: шумов источника сигнала, определяемых его внутренним сопротивлением при температуре  $T$ , и шумов, характеризующихся шумовыми свойствами системы

$$P_{\text{швых}} = kT\Delta K_p + kT_{\text{ш}}\Delta K_p. \quad (11)$$

Мощность выходных шумов источника (первое слагаемое) можно определить расчетным путем, так как  $T$ ,  $\Delta f$  и  $K_p$  известны. Температура  $T_{\text{ш}} = T(\text{Ш} - 1)$  является паспортным параметром конверторов спутникового телевидения.

Теперь обратимся к экспериментальной амплитудной характеристике радиометра (рис. 4), которая была получена в режиме «чистого неба». Влияние тропосферы здесь присутствует, и величина антенной температуры [4, 6] может составлять  $\sim 10$  К. Для исключения влияния тропосферы в нашей работе использованы особенности построения функциональной схемы спутникового конвертора (рис. 1). Для приема сигналов используется только один входной МШУ-1, вход которого с помощью зонда имеет связь с волноводным трактом. Второй МШУ-2 отключен от волноводного тракта (проведена доработка конвертора и демонтирован штырь связи). Таким образом, радиометр может работать в двух режимах: измерения и калибровки. Измерения производятся при включенном МШУ-1 и отключенном МШУ-2, а калибровка – наоборот. Как известно [5], отключение и подключение этих усилителей осуществляется изменением питающего напряжения с 13 до 18 В. Для автоматизации процесса калибровки был разработан специальный модулятор напряжения питания конвертора. Напряжение питания модулировалось последовательностью прямоугольных импульсов типа «меандр» с частотой следования 20 Гц, что обусловлено возможностями переключения конвертора. В одном из полупериодов меандра напряжение равно 18 В, в другом – 12 В. На рис. 6 показана временная зависимость выходного напряжения радиометра в

режиме калибровки. При этом на вход приемника с помощью переключателя подключена согласованная нагрузка.

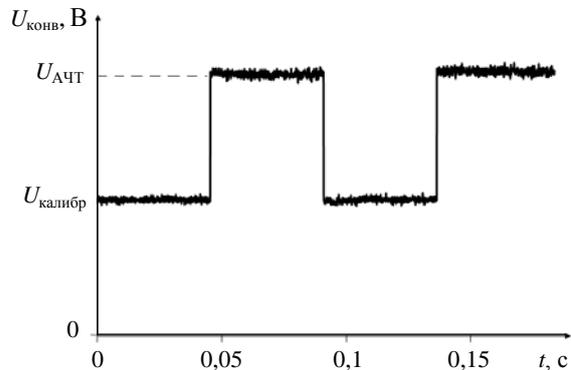


Рис. 6. Временная зависимость выходного напряжения радиометра в режиме калибровки

Таким образом, высокий уровень тепловых шумов ( $U_{\text{АЧТ}}$ ) соответствует тепловым шумам АЧТ  $\sim 300$  К, а другой полупериод соответствует выходным шумам самого приемного устройства  $P_{\text{швых}}$  (9). Значение  $P_{\text{швых}}$  не зависит от антенной шумовой температуры  $T_a$  как при калибровке по «чистому» небу. Оно определяется параметрами приемного устройства  $\Delta f$ ,  $K_p$  и  $T_{\text{ш}}$  входного МШУ-2 (рис. 1). Величина постоянной составляющей этого напряжения на выходе детектора  $E_0$  подается на инвертирующий вход схемы вычитания 10 (УПТ, рис. 2) для компенсации постоянной составляющей, обусловленной собственными шумами радиометра. На рис. 7 представлена зависимость выходного напряжения УПТ (рис. 2) от антенной температуры  $T_a$  после компенсации постоянной составляющей.

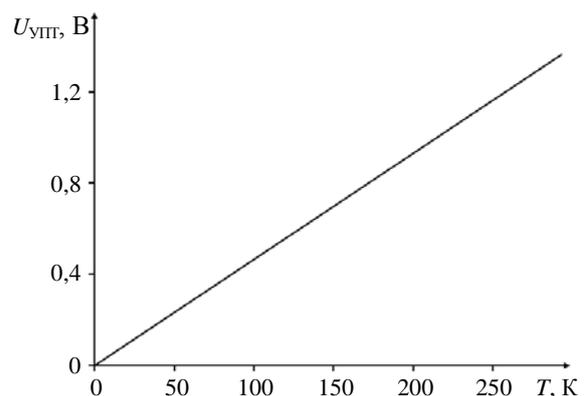


Рис. 7. График зависимости выходного напряжения УПТ от антенной температуры  $T_a$

Крутизна  $S$  шкалы приемника может быть определена следующим соотношением [2]:

$$S = \frac{U_{\text{вых1}} - U_{\text{вых2}}}{T_{\text{Э1}} - T_{\text{Э2}}}. \quad (12)$$

В нашем случае (рис. 7), если считать  $T_{22} = 0$  К, а  $T_{21} = 290$  К, крутизна шкалы приемника  $S = 0,2$  К/мВ.

**3. Результаты экспериментальных исследований.** Макет радиометра был установлен на поворотном устройстве, которое позволяло измерять угол места и азимут. На рис. 8 показана экспериментальная временная зависимость выходного напряжения радиометра, которая была получена 6 июля 2015 г. Применялась рупорная антенна с низким уровнем боковых лепестков диаграммы направленности. Мощное кучевое облако проходило в зоне диаграммы направленности антенны с 16:00 по 16:30. В это время наблюдалось возрастание сигнала до 200 мВ, что соответствует изменению антенной температуры  $\Delta T_a = 40$  К.

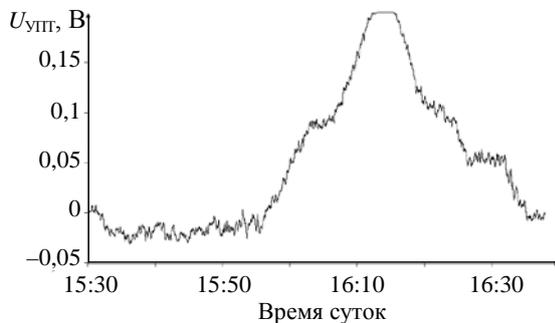


Рис. 8. Временная зависимость напряжения на выходе радиометра при прохождении мощного кучевого облака в зоне диаграммы направленности антенны

На рис. 9 показана временная зависимость выходного напряжения УПТ при прохождении белых кучевых облаков с незначительным влагосодержанием.

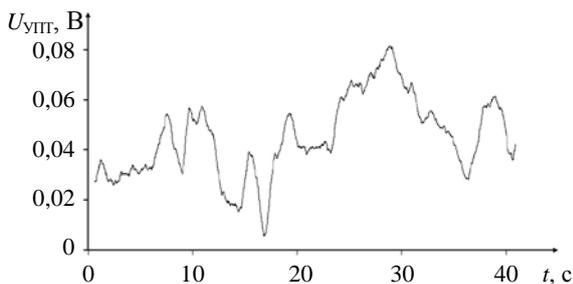


Рис. 9. Временная зависимость напряжения на выходе радиометра при прохождении облаков с незначительным влагосодержанием

Как видно из рисунка, при калибровочной крутизне  $S = 0,2$  К/мВ изменение антенной температуры составляло 4...12 К. В литературе [1] представлена зависимость радиояростной температуры в грозовом облаке от азимута на длине волны  $\lambda = 3,2$  см (рис. 10). В нашем случае (рис. 8) радиотепловое излучение отражает эволюцию водозапаса кучево-дождевого облака за

интервал времени с 15.05 до 16.30 на стадии диссипации. В 16.25 облако практически диссипировало. Аналогичная ситуация представлена на рис. 10, где на фоне жидкокапельной части облака видна область повышенного теплового радиополучения ( $T_a = 290$  К). После выпадения града радиотепловое излучение снизилось до  $\sim 20$  К.

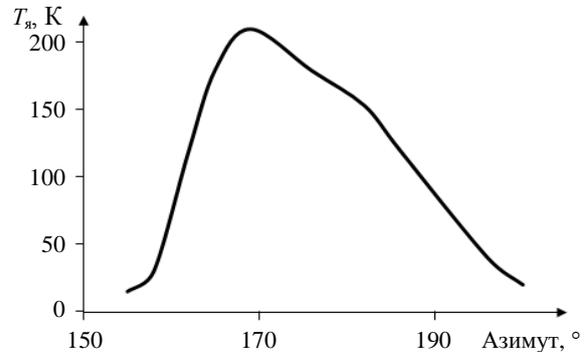


Рис. 10. График зависимости радиояростной температуры в грозовом облаке от азимута [1] на длине волны  $\lambda = 3,2$  см

**4. Построение радиометров компенсационного типа миллиметрового диапазона с преобразованием частоты и применением конвертера сантиметрового диапазона (рис. 11) в качестве высокочастотного промежуточного тракта.** На рис. 11 приведена функциональная схема радиометра миллиметрового диапазона с преобразованием частоты и применением конвертера сантиметрового диапазона в качестве усилителя первой промежуточной частоты в пределах 10,5...12,6 ГГц, имеющего усиление  $\sim 65$  дБ.

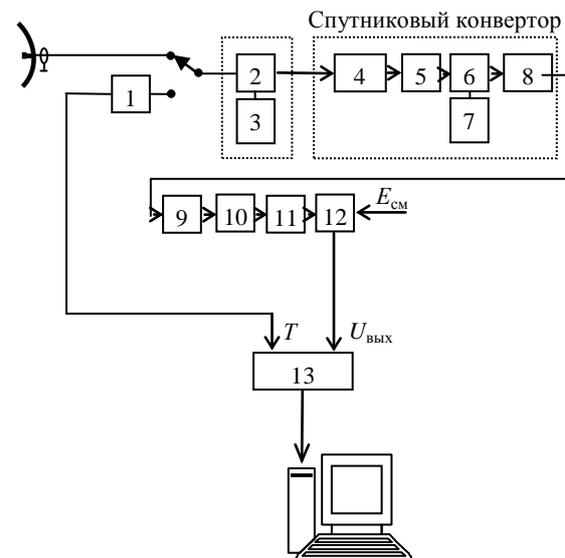


Рис. 11. Функциональная схема радиометра компенсационного типа миллиметрового диапазона с преобразованием частоты и применением конвертера сантиметрового диапазона: 1 – СЧ; 2 – СМ 1; 3 – гетеродин миллиметрового диапазона; 4 – МШУ; 5 – ППФ; 6 – СМ 2; 7 – Г; 8 – ПУПЧ; 9 – ШУ; 10 – АД; 11 – ФНЧ; 12 – УПТ; 13 – АЦП

Преобразователь частоты миллиметрового диапазона состоит из смесителя 2 и гетеродина 3, частота которого выбирается так, чтобы  $f_{ПЧ}$  лежала в пределах 10,5...12,6 ГГц. В преобразователе предусматривается подавление зеркального канала. Эта система может использоваться не только в радиометрах, но и в приемных устройствах другого назначения.

**5. Построение двухдиапазонного радиометра миллиметрового и сантиметрового диапазонов.** Функциональная схема двухдиапазонного радиометра показана на рис. 12.

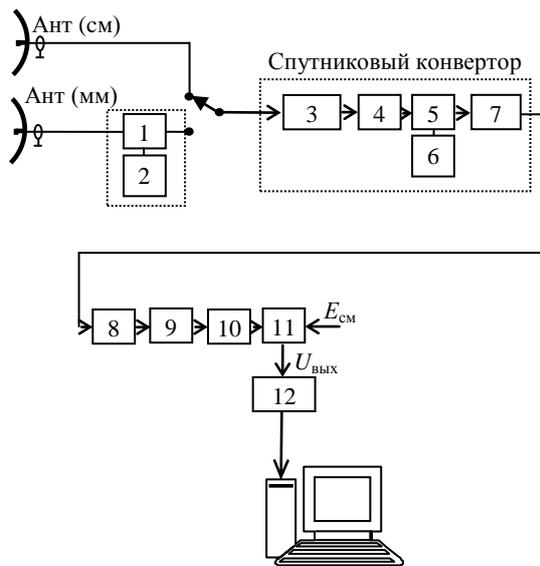


Рис. 12. Функциональная схема двухдиапазонного (миллиметрового и сантиметрового) радиометра компенсационного типа с преобразованием частоты и применением конвертора сантиметрового диапазона: 1 – смеситель миллиметрового диапазона; 2 – гетеродин миллиметрового диапазона; 3 – МШУ; 4 – ППФ; 5 – СМ; 6 – Г; 7 – ПУПЧ; 8 – ШУ; 9 – АД; 10 – ФНЧ; 11 – УПТ; 12 – АЦП

Основой этого радиометра является конвертор спутникового телевидения сантиметрового диапазона, на входе которого стоит высокочастотный переключатель. С помощью этого переключателя можно подсоединить конвертор к антенне сантиметрового диапазона или к выходу преобразователя частоты миллиметрового диапазона. Эта схема открывает новые возможности в экспериментальных исследованиях и практическом применении.

**Выводы.** Построение радиометров на основе конверторов спутникового телевидения позволяет реализовать высокую флуктуационную чувствительность  $\sim 0,01 \text{ K}^\circ \text{ C}$  в сантиметровом диапазоне, а в миллиметровом диапазоне чувствительность определяется прежде всего параметрами преобразователя частоты.

Использование конверторов в качестве высокочастотных усилителей промежуточной

частоты существенно упрощает их создание, дает возможность получить высокий коэффициент усиления ( $\sim 65 \text{ дБ}$ ) и стабильность параметров.

Несовпадение частоты излучения метрологических РЛС «МРЛ-1», «МРЛ-5» и сигналов спутникового телевидения дает возможность применять конвертор в комплексированных пассивно-активных системах и получить необходимую развязку.

К недостаткам следует отнести невозможность применения конверторов при ближней теплолокации из-за «пролаза» сигнала гетеродина, который необходимо уменьшить с помощью специальных фильтров.

### Библиографический список

1. Щукин Г. Г. Метеорологическая пассивно-активная радиолокация / Г. Г. Щукин, В. В. Булкин // Радиотехника и электрон. – 2011. – 56, № 5. – С. 549–572.
2. Степаненко В. Д. Радиолокация в метеорологии / В. Д. Степаненко. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 344 с
3. Мыценко И. М. Использование сигналов геостационарных ИСЗ для определения параметров гидрометеообразований / И. М. Мыценко, Д. Д. Халамейда, С. И. Хоменко // Радиопизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиопизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2007. – 12, № 1. – С. 195–199.
4. Николаев А. Г. Радиотеплолокация / А. Г. Николаев, С. В. Перцов. – М.: Сов. радио, 1964. – 335 с.
5. Корякин-Черняк С. Л. Справочник по ремонту и настройке спутникового оборудования / С. Л. Корякин-Черняк. – СПб.: Наука и техника, 2010. – 240 с.
6. Мыценко И. М. Особенности построения функциональных схем радиометров с применением конверторов спутникового телевидения / И. М. Мыценко, Д. Д. Халамейда // 25<sup>th</sup> Int. Crimean Conf. “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo’2015): Proc. – Sevastopol, 2015. – P. 1180–1181.
7. Мыценко И. М. Построение радиометров см-диапазона с применением конверторов спутникового телевидения / И. М. Мыценко, Д. Д. Халамейда // 9<sup>th</sup> Int. Kharkiv Symp. on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW’2016): Proc. – Kharkiv, 2016.
8. Бин Б. Р. Радиометеорология / Б. Р. Бин, Е. Дж. Даттон; пер. с англ. под ред. А. А. Семенова. – Л.: Гидрометеиздат, 1971. – 363 с.

Рукопись поступила 08.11.2016.

I. M. Mytsenko, D. D. Khalameyda

### CONSTRUCTION OF MM-BAND AND CM-BAND RADIOMETERS BASED ON SATELLITE LOW NOISE BLOCKS

Features of construction of mm-band and cm-band radiometers based on satellite low noise blocks (SLNB) are examined. The characteristics of the developed and constructed radiometer layout are presented. The experimental results are shown and compared with the published data. The possibility of using SLNB as an HF intermediate amplifier of mm-band radiometers and two-bandwidth radiometers is examined. A conclusion about receiving apparatus has been made.

**Key words:** radiometer, satellite low noise block.

І. М. Миценко, Д. Д. Халамейда

**ПОБУДОВА РАДІОМЕТРІВ МІЛІМЕТРОВОГО  
І САНТИМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНІВ  
НА ОСНОВІ КОНВЕРТОРІВ  
СУПУТНИКОВОГО ТЕЛЕБАЧЕННЯ**

Розглянуто особливості побудови радіометрів міліметрового і сантиметрового діапазонів на основі конверторів супутникового телебачення. Представлено робочі характе-

тики макета радіометра сантиметрового діапазону на основі конвертора супутникового телебачення. Запропоновано метод його калібрування. Показано результати експериментальних досліджень, які зіставлені з відомими даними. Розглянуто можливість застосування конвертора супутникового телебачення в якості високочастотного тракту проміжної частоти радіометрів міліметрового діапазону, а також дводіпазонного – міліметрового і сантиметрового діапазонів. Зроблено висновки про доцільність застосування конверторів супутникового телебачення для побудови радіометрів і інших приймальних пристроїв.

**Ключові слова:** радіометр, супутниковий конвертор.