

УДК 621.396

О.А. ВОЙТОВИЧ канд. техн. наук, *А.М. ЛИНКОВА* канд. физ.-мат. наук,
А.А. МОГИЛА канд. физ.-мат. наук, *В.П. МАЛЬЦЕВ*, *Г.А. РУДНЕВ*,
Г.И. ХЛОПОВ д-р техн. наук, *О.П. ГРИБСКИЙ*, *С.В. МАКОВЕНКО*,
С.Б. МАЛЬЦЕВ канд. техн. наук, *С.В. МИРОНЮК*, *В.Д. ПАВЛЕНКО*

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ СКАНИРУЮЩИЙ РАДИОМЕТР K_a ДИАПАЗОНА С АДДИТИВНО-ШУМОВЫМ ПИЛОТ-СИГНАЛОМ

Введение

При исследовании физических процессов, протекающих в атмосфере [1], и решении различных прикладных задач [2] значительное внимание уделяется разработке радиолокационных методов измерения характеристик облаков и интенсивности жидко-капельных осадков. В ИРЭ НАНУ, г. Харьков, для экспериментальных исследований создан активно-пассивный измерительный радиолокационный комплекс [3], состоящий из двухчастотного радиолокатора X - и K_a -диапазонов и радиометра X -диапазона. В состав радиометра, выполненного по модуляционной схеме, входит СВЧ-переключатель, коммутирующий вход МШУ с частотой 20 Гц между выходами антенны и высокостабильного источника шумов. Сигнал промежуточной частоты 1,2 ГГц приемной системы радиометра обрабатывается в полосе 30 МГц, определяющей радиометрический выигрыш, и подается на квадратичный детектор. Два приемопередатчика активного канала работают на общую зеркальную антенну диаметром 3 м, в фокусе которой расположены два облучателя с совмещенными фазовыми центрами. В пассивном канале используется оптимальная рупорно-параболическая антенна с раскрытием 260×220 мм, которая обеспечивает ширину диаграммы направленности по уровню половинной мощности 6° в E - и 8° в H -плоскости при уровне боковых лепестков не более – 27 дБ. Оси диаграмм направленности активного и пассивного каналов совмещены с точностью не хуже $0,1^\circ$.

Для повышения информативности и точности радиометеорологических измерений необходимо оснащение этого комплекса радиометрическим датчиком, измеряющим радиояркость температуру облачной атмосферы в K_a -диапазоне. Он должен быть сканирующим как по азимуту, так по углу места и устанавливаемым на отдельной платформе, что придаст датчику автономности и позволит наблюдать не только небосвод, но и решать задачи оценки характеристик подстилающей поверхности, в том числе и водной, а также задачу отработки алгоритмов “обнаружения-измерения”. Для работы в условиях мощных активных помех без захода в режим насыщения потребуются приемник с большим динамическим диапазоном.

Оптимальным устройством приема стохастических сигналов является энергетический приемник [4, 5], состоящий из усилителя с малым коэффициентом шума, квадратичного детектора и интегратора, сглаживающего флуктуации выходного колебания. Энергетический приемник является основой радиометра полной мощности [6], выходной сигнал которого пропорционален сумме шумовой температуры приемного устройства T_R и принятого сигнала T_A . Из-за наличия в выходном сигнале принципиально неустранимой составляющей в виде собственного шума T_R такой приемник имеет малый динамический диапазон (< 10 дБ) [7].

Этого недостатка лишен компенсационный радиометр [8], который имеет наилучшую флуктуационную чувствительность по сравнению с другими типами радиометров. В его схеме на выходе приемной системы с помощью специального источника компенсируется постоянное напряжение, создаваемое собственными шумами приемника. Однако флуктуации коэффициента усиления в этих двух типах радиометров приводят к значительной потере чувствительности.

Для устранения этого недостатка в модуляционном радиометре Дикке [9] установлен СВЧ переключатель, периодически подключающий ко входу приемника сигнал антенны или сигнал эталонного генератора шума. После квадратичного детектирования колебания огибающей подаются на синхронный детектор, на второй вход которого поступает сигнал с амплитудой, изменяющейся с частотой коммутации переключателя. Затем выходные сигналы синхронного детектора обрабатываются совместно для смежных полупериодов частоты коммутации. Благодаря этому в приемнике Дикке практически полностью исключаются флуктуации коэффициента усиления. Однако, с другой стороны, из-за наличия модуляции такой приемник имеет чувствительность вдвое меньшую по сравнению с приемником компенсационного радиометра. СВЧ переключатель, включенный на входе приемника, вносит неизбежные потери, и реальная чувствительность ухудшается еще больше. Кроме того, при переключениях изменяется коэффициент стоячей волны (КСВН) на его входе, что приводит к дополнительному снижению точности определения эквивалентной температуры шумового сигнала на входе приемника.

Флуктуационная чувствительность радиометра определяется величиной коэффициента шума входного каскада (малошумящего усилителя), постоянной времени интегратора и полосой пропускания приемника. Причем в модуляционном радиометре последнее ограничивается полосой пропускания СВЧ переключателя и ферритового вентиля, установленного на входе приемника для уменьшения влияния модуляции коэффициента стоячей волны при работе СВЧ переключателя, что неизбежно в миллиметровом диапазоне волн. Поэтому целесообразно изменить схему так, чтобы исключить переключатель из входных цепей радиометрического приемника и тем самым увеличением полосы пропускания улучшить чувствительность радиометра и упростить конструкцию СВЧ тракта приемника.

Настоящая статья посвящена описанию результатов разработки многофункционального высокочувствительного сканирующего радиометра K_a диапазона с аддитивношумовым пилот-сигналом и большим динамическим диапазоном.

Антенная система

Конструктивно сканирующий радиометр состоит из опорно-поворотного устройства, неподвижной и вращающейся частей, рис. 1.

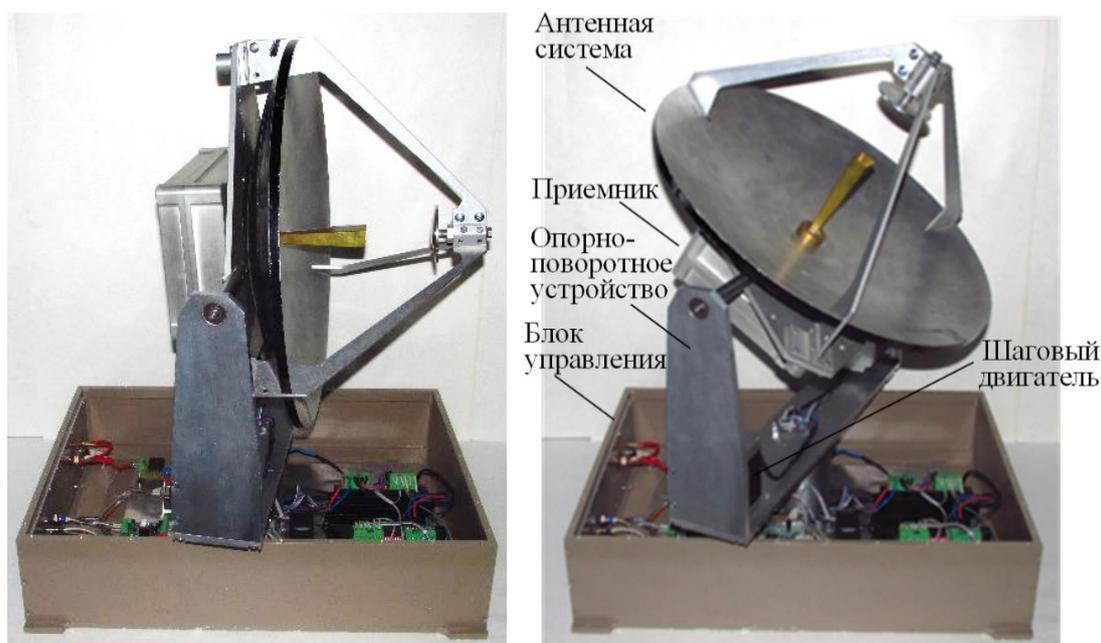


Рис. 1. Экспериментальный образец сканирующего радиометра (два ракурса)

Во вращающейся части датчика находятся антенная система, радиометрический приемник с блоком первичной обработки принимаемых сигналов K_a диапазона радиоволн и два шаговых двигателя, позиционирующие луч антенны в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

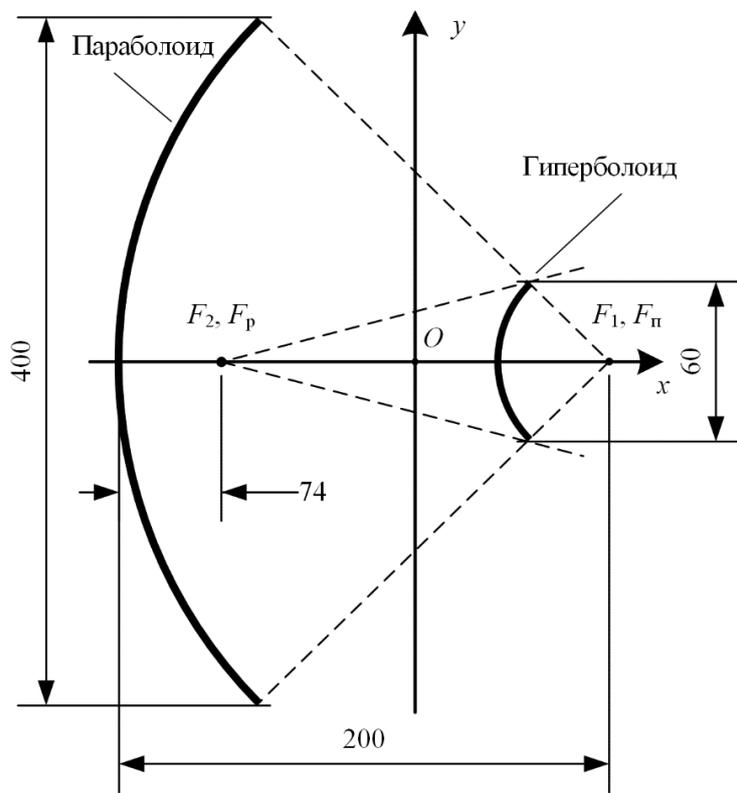


Рис. 2. Геометрия антенны Кассегрена

Антенная система выполнена на основе антенны Кассегрена [10, 11], состоящей из облучателя, параболического зеркала и контррефлектора – небольшого гиперболического зеркала. В этой антенне сферическая волна облучателя преобразуется с помощью последовательного отражения от двух зеркал в плоскую волну в фокальной плоскости рефлектора, где и формируется синфазное амплитудное распределение. Геометрия антенны Кассегрена показана на рис. 2.

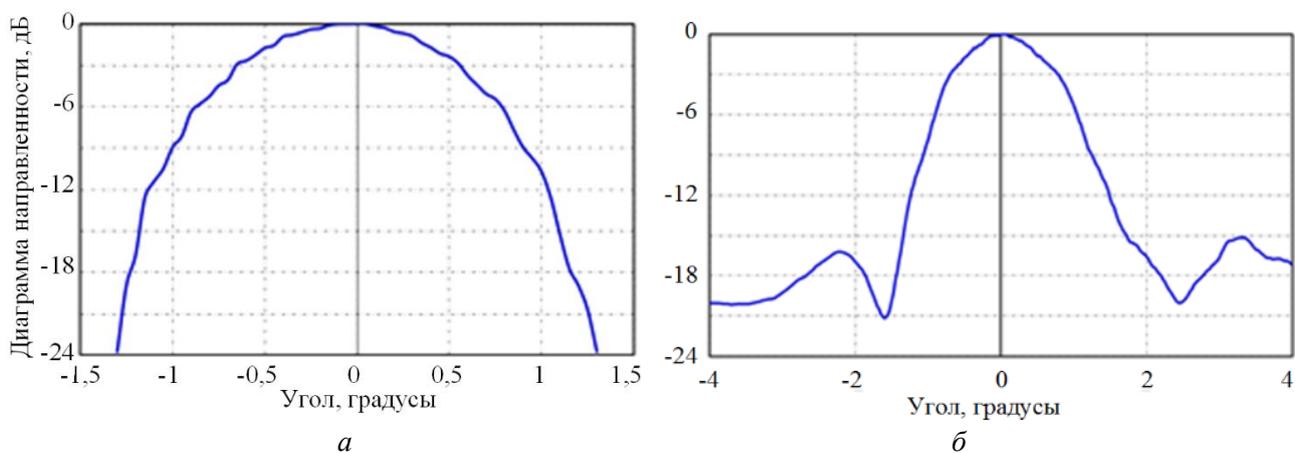


Рис. 3. Диаграмма направленности антенны Кассегрена
 a – Н-плоскость, b – Е-плоскость

Точками F_1 и F_2 обозначено положение внутреннего и внешнего фокусов контррефлектора. Внутренний фокус контррефлектора F_1 совмещен с фокусом параболического зеркала антенны F_n . Действительная ось гиперболы x совмещена с осями симметрии параболического зеркала антенны и гиперболического контррефлектора. Внешний фокус контррефлектора F_2 совпадает с фазовым центром рупорного облучателя F_p . Мнимая ось гиперболы y расположена на одинаковом расстоянии от фокусов F_1 и F_2 и пересекает ось x в точке O .

Описанная антенна изготовлена и на рис. 1 приведено фото конструкции антенны (диаметр параболического зеркала $D_A=400$ мм, а гиперболического – 60 мм).

Измерения показали, рис. 3, что ширина диаграммы направленности по уровню -3 дБ не превышает $1,4^\circ$ как в Е-, так и в Н-плоскости, уровень бокового излучения не более -15 дБ, а коэффициент усиления не менее 42 дБ.

Для обеспечения начальной привязки координат антенны к местности используются два микропереключателя, расположенных на неподвижной поверхности соответственно в азимутальной и угломестной плоскости опорно-поворотного устройства. Движущиеся «флажки» размещаются на подвижных азимутальной и угломестной поверхности антенны. В момент нажатия «поводка» микропереключателя с помощью движущегося «флажка» (азимутального или угломестного) формируется импульс, который сбрасывает соответствующий таймер в нуль, что соответствует началу отсчета. С этого момента происходит подсчет количества шагов, произведенных шаговым двигателем, осуществляющим перемещение антенны по азимуту или по углу места. В рассматриваемом датчике реализовано три режима сканирования – по азимуту, по углу места и растровое сканирование. В антеннах с механическим сканированием управление лучом достигается поворотом, вращением, качанием всей антенной системы, что ограничивает скорость сканирования.

Радиометрический приемник

Радиометрический приемник построен по супергетеродинной схеме с двухполосным приемом. Основное усиление и селекция происходит на промежуточной частоте (ПЧ). Для компенсации флуктуации коэффициента передачи в тракте приемника используется калиброванный генератор шума, неравновесный шумовой сигнал которого периодически подается на вход приемника, рис. 4.

Сигнал от антенны радиометра поступает на волноводный фланец радиометрического приемника с сечением волновода $7,2 \times 3,4$ мм. Далее принятый сигнал через прямое плечо направленного ответвителя (НО) подается на двухполосный смеситель (СМ). Также на смеситель через ответвленное плечо направленного ответвителя поступает модулированный сигнал от твердотельного генератора шума (ГШ), построенного на базе лавинно-пролетного диода. Конструктивно со смесителем совмещен малошумящий усилитель промежуточной частоты (ПУПЧ) с полосой усиления $0,2 - 2,7$ ГГц. В качестве гетеродина (Γ) используется умножитель частоты на 4, синхронизируемый генератором с фиксированной частотой 9 ГГц. Таким образом, осуществляется перенос двух полос $33,3 - 35,8$ ГГц и $36,2 - 38,7$ ГГц на одну ПЧ, что позволяет снизить приведенный ко входу приемника коэффициент шума. Далее сигнал усиливается с помощью усилителей промежуточной частоты (УПЧ). Фильтр промежуточной частоты (ФПЧ) служит для ограничения детектируемого сигнала по полосе частот и коррекции неравномерности коэффициента усиления. Усиленный сигнал ПЧ поступает на логарифмический детектор среднеквадратичного (rms) значения (ЛДС), выполненный на основе микросхемы AD8362 [12]. Продетектированное напряжение через фильтр нижних частот (ФНЧ) Чебышева 3-го порядка с частотой среза 300 кГц подается на контроллер (МК), выполненный на однокристальном микроконтроллере STM32, с помощью которого реализуется управление приемником и цифровая обработка принятого сигнала. Рассчитанное в МК значение шумовой температуры сигнала на входе приемника выводится через UART интерфейс в виде текстовой информации в ASCII кодах. Сигналы UART интерфейса через драйвер интерфейса RS-422 и блок гальванической развязки (БР) поступают на внешний разъем радиометра для соедине-

ния с компьютером (ПК). Также через RS-422 и UART интерфейс осуществляется управление режимами работы радиометра. Кабель, длина которого может достигать 100 м, и преобразователь интерфейсов (ПИ) RS422/USB/COM служат для подключения радиометра к USB входу ПК.

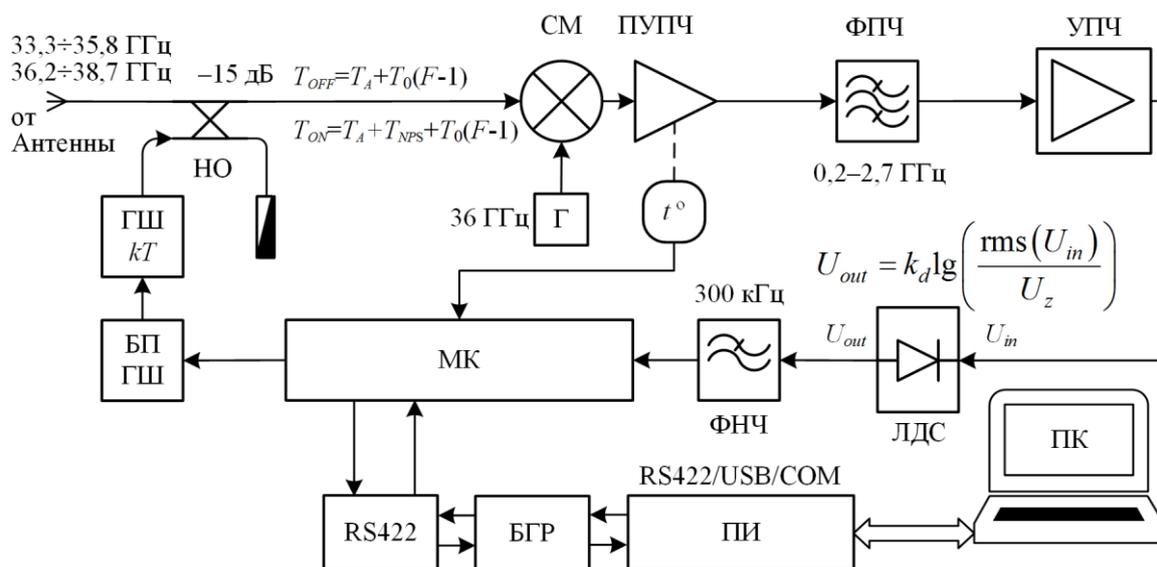


Рис. 4. Структурная схема приемного устройства

Для шумового сигнала, приведенного к входу приемника, можно записать эквивалентную шумовую температуру при выключенном T_{OFF} и включенном T_{ON} генераторе шума:

$$T_{OFF} = T_A + T_0(F - 1), \quad (1)$$

$$T_{ON} = T_A + T_0(F - 1) + T_{NPS}, \quad (2)$$

где T_A – температура, эквивалентная входному сигналу антенны; $T_0=293K$; F – коэффициент шума приемника; T_{NPS} – эквивалентная температура, вносимая генератором шума. Здесь учтено [13], что

$$F = 1 + \frac{T_M + T_{IF}}{T_0 2k_M}, \quad (3)$$

где T_M и T_{IF} – температура эквивалентная шуму, вносимому смесителем и предварительным усилителем ПЧ соответственно; k_M – однополосный коэффициент передачи смесителя.

Напряжение на выходе детектора U_{out} в зависимости от эквивалентной температуры шумового сигнала приведенной ко входу приемника T можно записать как

$$U_{out} = k_d 10 \lg \left(\frac{k T k_r \Delta F}{P_z} \right) = k_d 10 \lg \left(\frac{T}{T_z} \right), \quad (4)$$

где k_d – чувствительность детектора; k_r – коэффициент передачи приемника; ΔF – полоса пропускания приемника; P_z и T_z – пороговая мощность и соответствующая ей эквивалентная пороговая температура детектора, при которых логарифм обращается в нуль. Изменение напряжения на выходе детектора при переключении генератора шума из выключенного состояния во включенное, таким образом, составит

$$\Delta U = k_d 10 \lg \left(\frac{T_{ON}}{T_{OFF}} \right). \quad (5)$$

Обозначая

$$R = \frac{T_{ON}}{T_{OFF}} = 1 + \frac{T_{NPS}}{T_A + T_0(F-1)}, \quad (6)$$

из соотношения (5) получаем

$$R = 10^{\Delta U / 10k_d}, \quad (7)$$

а из соотношения (6)

$$T_A = \frac{T_{NPS}}{R-1} - T_0(F-1). \quad (8)$$

Таким образом, измерив разность напряжений при включенном и выключенном генераторе шума, а также зная неравновесную шумовую температуру генератора шума и коэффициент шума приемника, можно определить эквивалентную температуру шумового сигнала на входе приемника.

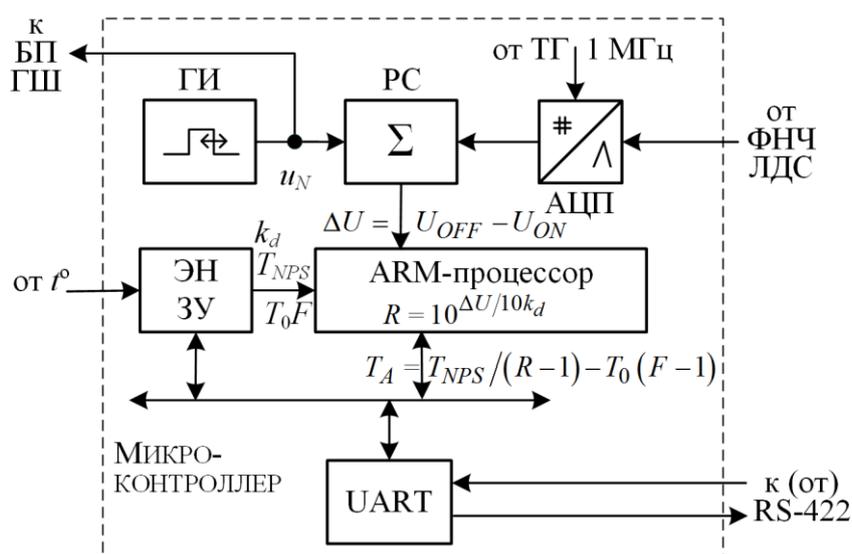


Рис. 5. Структурная схема блока цифровой обработки

Цифровая обработка и интерфейс реализованы на микроконтроллере STM32F051 [14], рис. 5. Генератор импульсов (ГИ) реализован на базе таймера TIM3 в режиме широтно-импульсной модуляции. По переполнению таймера TIM3 запускается таймер TIM15 в однократном режиме, переполнение которого синхронизирует первое преобразование АЦП.

АЦП представляет собой внутренний 12 битный АЦП контроллера с тактовой частотой 14 МГц, что позволяет поддерживать скорость преобразования в непрерывном режиме 1 Мвыборка/с. Синхронизация АЦП осуществляется от системного тактового генератора (ТГ), благодаря чему АЦП работает когерентно с генератором ГИ. АЦП запускается совместно с системой прямого доступа к памяти DMA, которая работает с кольцевым FIFO-буфером в ОЗУ на 2048 выборки, что обеспечивает не менее 2 мс запас для выполнения контроллером других задач. Выходной сигнал АЦП суммируется в реверсивном сумматоре (РС) со знаком плюс, если сигнал ГИ u_N принимает низкий уровень (ГШ выключен) и со знаком минус – если высокий (ГШ включен). После накопления в сумматоре N -го количества данных (кратных периоду таймера TIM3), которые определяются временем интегрирования, результат суммирования делится на количество N накоплений:

$$\Delta U = U_{OFF} - U_{ON} = \frac{1}{N} \left(\sum_{n=1}^{N/2-1} u_n - \sum_{n=N/2}^{N-1} u_n \right) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N-1} u_n \text{Sing}(u_N).$$

Таким образом, выходной сигнал сумматора представляет собой усредненную за время интегрирования разность напряжений логарифмического детектора, что можно представить, как отношение мощностей (6). На основании полученного значения в ARM-процессоре рассчитывается температура антенны из соотношений (7) и (8). Здесь предварительно путем линейной интерполяции вычисляются параметры k_d , T_{NPS} и T_0F для текущей температуры корпуса на основе табличных значений, которые получены при разных температурах корпуса и сохранены в энергонезависимой памяти (ЭНЗУ). Текущая температура корпуса измеряется с помощью встроенного термометра (t°), рис. 4. Рассчитанная температура антенны выводится в виде текстового сообщения по гальванически развязанному интерфейсу UART (RS-422).

Электропривод сканирующего радиометра

Опорно-поворотное устройство служит для передачи нагрузок от подвижной части радиометра на неподвижную и для позиционирования луча антенны в требуемом направлении, рис. 1.

К неподвижной части сканирующего радиометра относится корпус блока управления, рис. 6, в котором расположены источник питания (БП), драйверы шаговых двигателей, блок управления электроприводом, выполненный на микроконтроллере типа STM32F3. Данные о положении антенного луча выводятся через UART интерфейс в двоичных кодах. Сигналы UART-интерфейса через драйвер интерфейса (ПИ) TTL-485 и гальванический изолятор поступают на внешний разъем блока управления для соединения с компьютером, при этом используется преобразователь интерфейсов ПИ USB-485. Также через TTL-485 и UART интерфейс управляет режимами работы электропривода с помощью ПК.

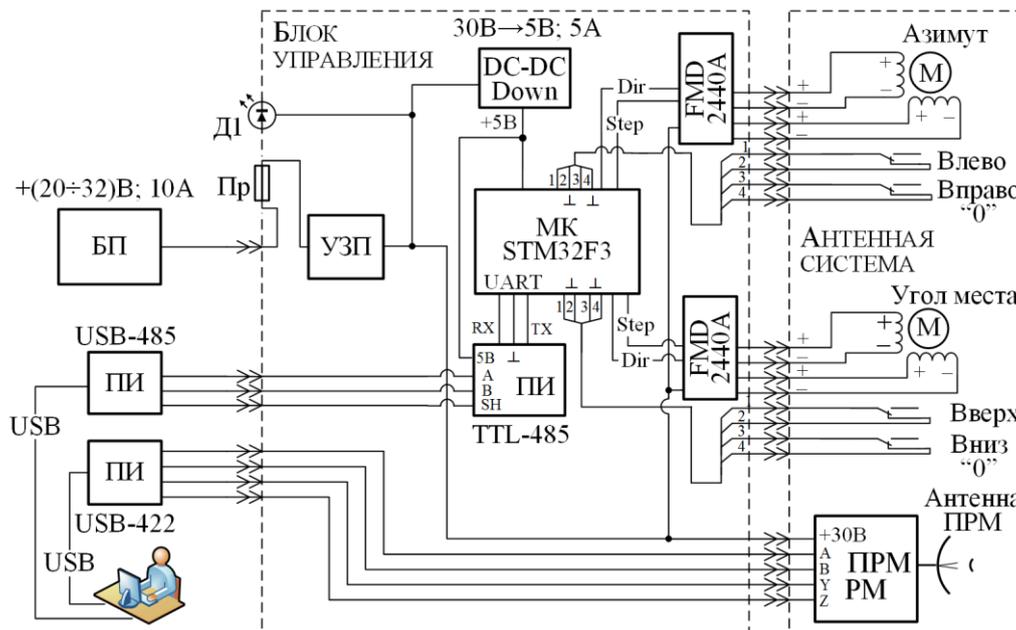


Рис. 6. Структурная схема электропривода сканирующего радиометра

В состав привода входят электромеханический привод (антенный модуль), микроконтроллерная система управления и блок обработки данных, выполненный на основе персонального компьютера. Для позиционирования антенны в азимутальной и угломестной плоскостях используются два шаговых двигателя (М) типа SM57HT76-2804A, работающих от постоянного напряжения 20 – 30 В. С их помощью происходит преобразование внешних

управляющих сигналов в угловое перемещение ротора и его фиксация в заданном положении без применения устройств обратной связи. Коммутация фаз шагового двигателя осуществляется с помощью блока управления в соответствии с получаемыми логическими сигналами уровня. Источником управляющих импульсов служит внешний микроконтроллер (МК), выполненный на микросхеме STM32F303VC [15]. Управление вращением вала двигателя осуществляется посредством логических сигналов «Step», «Dir» и «EN», подаваемых на вход драйвера FMD2440A, выполненного на основе микроконтроллера TB6600. Поворот ротора двигателя на один шаг или часть шага осуществляется по переднему фронту сигнала «Step», в сторону, заданную сигналом «Dir». Движение может быть остановлено при подаче управляющего сигнала высокого уровня на вход «EN». Величина дробления шага, рабочего тока фазы и тока удержания устанавливается с помощью микропереключателей, расположенных на плате блока под крышкой. Гальваническая развязка применяется для исключения влияния помех, создаваемых сильноточными ключами в плате драйвера шагового двигателя. Так как позиционирование антенного луча производится с помощью шаговых двигателей с погрешностью, не превышающей 5,4 минуты, то устанавливать датчики положения антенны не потребовалось, что существенно упростило систему управления.

Контроллер привода выполнен на основе микроконтроллера STM32F303, в котором реализованы требуемые интерфейсы, алгоритмы обработки сигналов положения антенны, средства программирования STM32. Микроконтроллер выполняет обработку команд персонального компьютера и управляет приводом в соответствии с заданным законом. Связь контроллера с персональным компьютером радиометра происходит по интерфейсу RS-485.

Пользовательский интерфейс

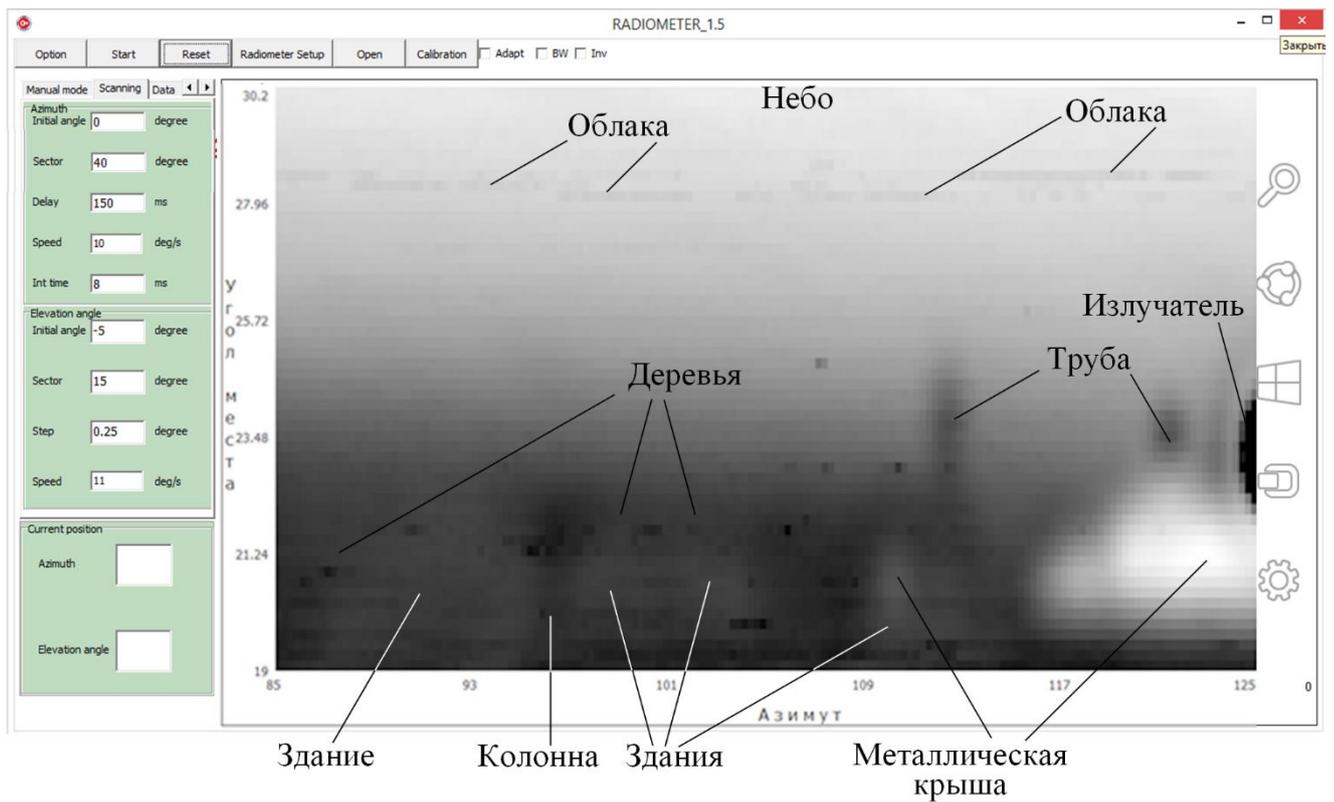
Для получения цветного радиометрического 2D изображения сканируемой поверхности разработано программное обеспечение в виде пользовательского интерфейса, рис. 7, а, который включает несколько режимов работы: режим управления поворотным устройством антенны (в том числе режим сканирования), режим настройки радиометра и режим пост-обработки изображения.

Для построения двумерного изображения разработанное программное обеспечение осуществляет объединение данных о радиояркой температуре и угловых координатах, получаемых от радиометра и поворотного устройства антенны соответственно.

Режим сканирования предназначен для установки требуемых параметров сканирования – сектора углов, скорости движения поворотного устройства, времени интегрирования сигналов радиометра. Перед отображением изображения на экране осуществляется предварительная калибровка полученных данных согласно ранее введенным калибровочным коэффициентам. Данные сканирования автоматически записываются в двоичный файл.

Режим настройки радиометра позволяет изменять параметры радиометра согласно поставленной задаче, а также просматривать измеренные данные радиояркой температуры окружающей среды.

Пост-обработка изображения включает возможность отображения данных растрового сканирования в виде цветного или черно-белого (в позитиве или негативе) изображения, изменения максимального и минимального уровня сигнала, осуществление сдвига строк. При этом возможно просматривать результаты предыдущих сканирований.



a



б

Рис. 7. Пример панорамного радиотеплового изображения (*a*) и фото наблюдаемой сцены (*б*)

Результаты экспериментальных исследований

Как показали результаты испытаний, флуктуационная чувствительность радиометра не хуже $0,1K$ при времени накопления 100 мс.

С помощью сканирующего радиометрического датчика получено панорамное радиотепловое изображение, рис. 7, *a*, качество которого, в первую очередь, определяется разрешающей способностью радиометра по угловым координатам λ/D_A и расстоянием до цели R . На расстоянии порядка 200 м, которое соответствует полученному радиотепловому изображе-

нию, разрешающая способность по полю изображения $\Delta x \approx R\lambda/D_A$ не превышает 4 м, что и определяет его качество. Фото полученной панорамы приведено на рис. 7, б.

При этом “холодное небо” имеет светлый оттенок (температура 110К), крыша здания в правом нижнем углу переотражает “холодное небо” и также отображается светлым оттенком, температура 80 – 100 К, окружающие здания и деревья имеют средние значения температуры и отображаются промежуточным серым оттенком, температура 240 – 260 К. Отметим, что приведенный пример радиотеплового изображения сформирован при условиях, далеких от оптимальных, поэтому даже в условиях разработанного образца имеются определенные перспективы улучшения наглядности радиотеплового изображения.

Выводы

В конструкции радиометра использована двухзеркальная антенна Кассегрена, ширина диаграммы направленности которой по уровню – 3 дБ не превышает $1,4^\circ$ как в Е-, так и в Н-плоскости, уровень бокового излучения не более – 15 дБ и коэффициент усиления не менее 42 дБ.

Чувствительность радиометра с применением только аддитивно-шумового пилот-сигнала оказалась сравнима с модуляционным радиометром Дикке, что обусловлено отсутствием модулятора в СВЧ тракте, который неизбежно вносит потери. Кроме того, отсутствие модулятора на входе приемника позволяет существенно (до 5 ГГц) увеличить его полосу пропускания. Флуктуационная чувствительность разработанного радиометра 0,1К при времени накопления 100 мс.

Использование на выходе приемника логарифмического детектора среднеквадратических значений вместо квадратичного позволило расширить динамический диапазон радиометра до 60 дБ. Его величина хорошо согласуется с динамическим диапазоном встроенного в микроконтроллер 12-битного АЦП, используемого в разработанном радиометре.

Режим растрового сканирования позволяет получать радиотепловые изображения наблюдаемого участка небосвода, несущие информацию о водозапасе облачной атмосферы, водности и интенсивности осадков или обнаруживать и оценивать угловые координаты целей, расположенных на наблюдаемом участке подстилающей поверхности. Радиометр также может использоваться для отработки алгоритмов “обнаружения-измерения” в условиях мощных активных помех и при этом не входить в режим насыщения.

Список литературы:

1. Скорер Р.С. Аэродинамика окружающей среды. Москва : Мир, 1980. 549 с.
2. Алексеев М.И., Кармазинов Ф.В., Степаненко В.Д. и др. Применение данных метеорадиолокаторов для прогноза поступления дождевых вод в систему водоотделения Санкт-Петербурга // Труды Главной Геофизической Обсерватории им. Ф.И. Воейкова. 2007. Вып. 556. №11. С. 56–68.
3. Веселовская А.Б., Кабанов В.А., Линкова А.М., и др. Восстановление вертикального профиля облаков с помощью активно-пассивного зондирования/ А.Б. Веселовская, В.А. Кабанов, А.М. Линкова, А.В. Одновол, Т.А. Ткачева, Г.И. Хлопов, С.И. Хоменко // Радиофизика и электроника. 2017. Т. 22. № 2. С. 58-65.
4. Радиотехнические системы / Ю. П. Гришин, В. П. Ипатов, Ю. М. Казаринов и др. ; под ред. Ю. М. Казаринова. Москва : Высш. шк., 1990. 496 с.
5. Kostylev V. I. Energy Detection of a Signal with Random Amplitude // Proc. IEEE Int. Conf. Communications (ICC'02). 2002. P. 1606 -1611.
6. Ulaby F., Moore R., Fung A. Microwave remote sensing: Active and Passive, vol. 1: Microwave Remote Sensing Fundamentals and Radiometry, Artech House, 1981. P. 456.
7. Скольник М. Справочник по радиолокации ; пер. с англ. под общей ред. Трофимова К. Н. ; в 4-х т. Т. 4: Радиолокационные станции и системы ; под ред. М.М. Вейсбейна. Москва : Сов. радио, 1978. 376 с.
8. Краус Дж.Д. Радиоастрономия. Москва : Сов.радио, 1973. 456 с.
9. Dicke R.H. The measurement of thermal radiation at microwave frequencies// R.H. Dicke / Review of Scientific Instruments. AIP. 1946. 17 (7). 268-275. doi:10.1063/1.1770483.
10. Бахрах Л.Д. Многозеркальные антенные системы // Труды НИИ-17. 1953. Вып. III (30). С. 12 – 23.
11. Hannan P.W. Microwave Antennas Derived from the Cassegrain Telescope // IRE Transactions, AP, March, 1961, pp. 140-153.

12.AD8362 50 Hz to 3.8 GHz 65 dB TruPwr™ Detector [Электронный ресурс]: Datasheet / Analog Devices. Техническая спецификация. Режим доступа: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/AD8362.pdf>

13.Сколник М. Справочник по радиолокации ; пер. с англ. под общей ред. Трофимова К. Н. ; в 4-х т. Т. 1: Основы радиолокации ; под ред. Я.С. Ицхоки. М.: Сов. радио, 1976. 456 с.

14.STM32F051x4 STM32F051x6 STM32F051x8 ARM®-based 32-bit MCU, 16 to 64 KB Flash, 11 timers, ADC, DAC and communication interfaces [Электронный ресурс]: Datasheet / st. Production data. Режим доступа: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/dm00039193.pdf>

15.STM32F303xB STM32F303xC Arm®-based Cortex®-M4 32b MCU+FPU, up to 256KB Flash+ 48KB SRAM, 4 ADCs, 2 DAC ch., 7 comp, 4 PGA, timers [Электронный ресурс]: Datasheet / st. Production data. Режим доступа:<https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f303vc.pdf>

*Институт радиофизики и электроники
имени А.Я. Усика НАН Украины*

Поступила в редколлегию 05.05.2019