

РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ, ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ

УДК 621.396.96: 551.501

*В.В. ПАВЛИКОВ, д-р техн. наук, Н.В. РУЖЕНЦЕВ, д-р техн. наук,
А.Д. СОБКЛОВ, Д.С. САЛЬНИКОВ, А.И. ЦОПА, д-р техн. наук*

НАЗЕМНЫЙ РАДИОМЕТРИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ВОЛН ДЛЯ ЗАДАЧ МЕТЕОРОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

Введение

В настоящее время в Украине отсутствуют системы непрерывного мониторинга термо- и гидродинамических характеристик тропосферы: эффективной температуры облаков, общего содержания водяного пара и капельной влаги. Важность непрерывных изменений вызвана тем, что в атмосфере помимо устойчивых метеообразований наблюдаются и быстропротекающие процессы, которые оказывают влияние на качество решения задач метеорологии [1], радиоастрономии [2], перспективных систем телекоммуникаций [3 – 5] и др. Учет влияния таких быстропротекающих процессов невозможно получить из дискретных ведомственных запусков технологических радиозондов и отдельных научных экспериментов с использованием дистанционных акустических и оптических приборов. В рамках нового проекта совместных исследований физических и радиофизических свойств атмосферы, разработанного ХАИ и ХНУРЭ, предполагается дополнить существующую метеорологическую сеть аэрологического мониторинга дистанционными приборами, обеспечивающими непрерывность измерений. Не менее важной задачей, которая может быть решена с помощью разработанного измерительного комплекса, является определение статистики значений и флуктуаций полного вертикального ослабления радиоволн миллиметрового диапазона. Эти сведения важны для развития наземно-космических систем связи, в том числе для внедрения нового поколения телекоммуникационных технологий 5G формата в различных регионах Украины [3, 4].

Необходимость решения поставленных телекоммуникационных и метеорологических задач для Украины подтверждается рекомендациями ИТУ о необходимости накопления данных об атмосферном ослаблении сигналов в миллиметровом диапазоне длин волн (ММ ДВ) для обеспечения учета микроклиматических региональных особенностей [6], а также практикой использования схожих аппаратных комплексов ММ ДВ в организациях гидрометеорологических служб Германии, Голландии, России, США, Японии и др.

В связи с этим, а также в связи с необходимостью обеспечения круглосуточного мониторинга и сбора в автоматическом режиме радиофизических и метеорологических данных совместно ХНУРЭ и ХАИ был разработан и изготовлен опытный образец двухчастотного наземного радиометрического комплекса. В состав комплекса вошли разработанные и изготовленные приборы супергетеродинного типа: модуляционный радиометр диапазона 40 ГГц ($\lambda = 8 \text{ мм}$) (кафедра радиотехнологий информационно-коммуникационных систем – РТИКС, ХНУРЭ) и модуляционный радиометр диапазона 94 ГГц ($\lambda = 3 \text{ мм}$) (кафедра проектирования радиоэлектронных систем летательных аппаратов – ПРЭСЛА, ХАИ).

Главными критериями выбора схемных и технических решений помимо обеспечения приемлемой для поставленных задач чувствительности (не хуже 0.3 К, что соответствует возможности идентификации изменчивости атмосферного ослабления менее 0.005 дБ) предпочтение отдавалось минимизации стоимости используемой элементной базы при обеспечении надежности работы и простоты эксплуатации аппаратуры измерительного комплекса (из соображений его широкомасштабного использования в гидрометеорологии).

Основная часть

На рис. 1 представлена структурная схемы разработанного измерительного комплекса в составе двух измерительных радиометров 3- и 8-миллиметрового диапазонов.

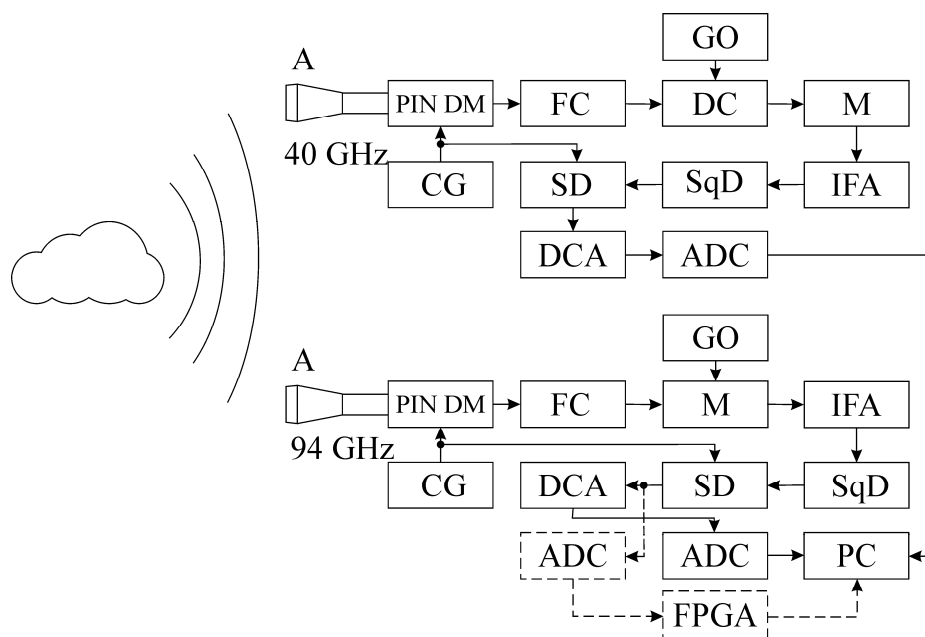


Рис. 1

Радиометр 8 ММ ДВ построен по модуляционной схеме с приемником супергетеродинного типа, в котором используется двухполосный режим приема. На рис. 1 представлены следующие элементы радиометра: антенна (A), *PIN* диодный модулятор (*PIN DM*), ферритовый циркулятор (*FC*), смеситель (*M*), осциллятор на диоде Ганна (*GO*), усилитель промежуточной частоты (*IFA*), квадратичный детектор (*SqD*), синхронный детектор (*SD*), усилитель постоянного тока (*DCA*), аналого-цифровой преобразователь (*ADC*), персональный компьютер (*PC*), программируемая логическая матрица (*FPGA*).

На рис. 2 показаны конструктивные элементы, использованные при построении радиометра 3 ММ ДВ: антенна (1), ферритовый циркулятор (2), *PIN* диодный модулятор (3), смеситель (4), гетеродин на диоде Ганна (5).

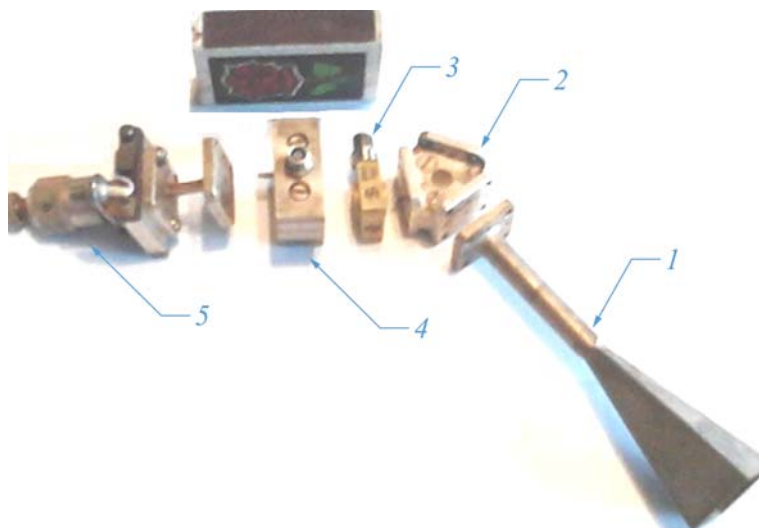


Рис. 2

Разработанная радиометрическая система предусматривает возможность перевода радиометра из режима измерений радиояркости в режим поляризационных измерений, при котором на выходе радиометра выделяется сигнал разности радиоярких температур между вертикальной и горизонтальной поляризациями. Такой режим работы представляет интерес для задач дистанционного исследования микроструктуры кристаллической составляющей облаков либо при исследованиях поляризационных отличий земных покровов и объектов

техники. Техническое обеспечение поляриметрического режима работы осуществляется за счет использования в качестве модулятора специальных ферритовых Y-переключателей [7] нагруженных на две антенны, настроенные на прием разных поляризаций. Выходной сигнал такого радиометра характеризует величину различий радиояркостной температуры объекта, на который направлены обе антенны.

В качестве вспомогательного оборудования в состав обоих радиометров измерительного комплекса входят РС для обработки данных и калибровочные нагрузки, выполненные в виде оригинальной трехслойной конструкции из высокоэффективного радиопоглощающего материала, состоящего из игольчато-сетчатой ковровой структуры типа «Ворс», радиопоглощающего слоя объемной структуры, изготовленного в виде полотна трикотажного переплетения, а также слоя нецеллюлозной (кремниевоволоконной) бумаги типа АРР с профилированной поверхностью.

В качестве антенны радиометра с центральной частотой настройки приемника 40 ГГц использован диагональный рупор с апертурой 50x50 мм², что обеспечило ширину диаграммы направленности (ДН) около 5° при УБЛ -18 дБ и кроссполяризационном уровне -14 дБ [8]. Модулятор на PIN диоде U-7.2.242011 обеспечивает в полосе 39 – 42 ГГц потери сигнала менее 0,5дБ, а величина потерь переключающего ферритового Y-циркулятора [7] составляет в прямом направлении 0,4 дБ при обратных потерях более 20 дБ. Этот циркулятор выполняет функции вентиля при работе системы в обычном режиме радиометра и функции модулятора сигналов от двух идентичных антенн с различной поляризацией при работе в режиме радиометра-поляриметра.

После Y-циркулятора принятый сигнал попадает на вход волноводного направленного ответвителя, имеющего потери сигнального канала 0,5дБ при направленности -18дВ и потерях в канале гетеродина – 14дБ. К выходу направленного ответвителя подключен смеситель с резонаторной камерой пониженного сечения волновода [7], в которой расположен смесительный диод с барьером Шоттки бескорпусного типа.

В качестве гетеродина использован генератор Ганна с выходной мощностью около 15 мВт на частоте 40 ГГц. Резонаторная камера гетеродина представляет собой отрезок стандартного волновода 8 мм с встроенным в него диодом марки «AAA 727В». Резонаторная камера нагружена с одной стороны на цилиндрический резонатор, а с другой стороны соединена с ферритовым циркулятором, через который сигнал гетеродина проходит к направленному ответвителю.

С выхода смесителя сигнал промежуточной частоты поступает на малошумящий предварительный усилитель и каскады УПЧ, которые выполнены на стандартных модулях УТР-5. Полоса пропускания узла УПЧ 500-1000МГц при коэффициенте усиления около 60 дБ.

К выходу УПЧ подключен квадратичный детектор, с которого зашумленный НЧ сигнал частоты модуляции поступает на синхронный детектор и интегратор, а затем через DCA проходит к устройству ADC и компьютеру.

Сотовая структура бескорпусного смесительного диода с барьером Шоттки, генераторный диод Ганна и широкополосный PIN диодный модулятор с малым уровнем потерь изготовлены в НИИ ПП г. Томска (Россия). Остальные элементы СВЧ тракта были изготовлены на опытном производстве ИРЭ НАНУ (г. Харьков, Украина).

Таким образом, отметим, что общие СВЧ потери сигнала во входном тракте радиометра составили около 2дБ. Оценочная величина потерь преобразования смесителя близка к 7дБ.

Выбранные схемные и аппаратурные решения обеспечили измеренную методом двух нагрузок [9] флуктуационную чувствительность построенного радиометра около 0.2 К, что находится в хорошем соответствии с проведенными расчетными оценками этого основного параметра радиометра.

Здесь следует заметить, что если радиометр 40 ГГц построен по классической для супергетеродинного модуляционного радиометра схеме, то структурное построение радиометра 94 ГГц отличается от существующих аналогов (например, [9]) применением бездиплексерной схемы построения его СВЧ части. К преимуществам предложенной схемы [10, 11], помимо возможности более компактной и экономичной реализации, следует, прежде всего, отнести

существенно пониженные (более чем на порядок) требования к выходной мощности гетеродина). Такое решение позволило использовать перестраиваемый в полосе более 10 ГГц генератор Ганна, к тому же с резонансной камерой, настраиваемой на режим минимизации шумов гетеродина (вместо традиционно используемого режима максимальной выходной мощности). Такой генератор Ганна был разработан нами на основе конструкции Барта [12, 13] путем эвристического подбора геометрии резонансной камеры применительно к использованию диода Ганна марки «АА 741». Подстроечные коротко-замыкающие поршни этого генератора одновременно служат для подстройки оптимального режима работы смесителя построенного на основе бескорпусного диода с барьером Шоттки, расположенном в полновысотном волноводе сечения $1.2 \times 2.4 \text{ мм}^2$ [14] (рис. 2). Особенность работы этого радиометра и в том, что он предусматривает возможность принципиально новой обработки сигналов радиотеплового излучения [15 – 17] (см. канал, содержащий два *ADC* и *FPGA* на рис. 1).

Как и в предыдущем радиометре возможен режим работы поляризационных измерений, при котором на выходе радиометра выделяется сигнал разности радиоярких температур между вертикальной и горизонтальной поляризациями.

Параметры элементов СВЧ тракта этого радиометра следующие: рупорная антенна с изломами угла раскрытия с 5° ДН при УБЛ -18 дБ и кроссполяризационном уровне – 20 дБ [18]. PIN модулятор «ПГВ2.242» обеспечивает в полосе 90 – 96 ГГц потери сигнала менее 1.2 дБ (запирание 25 дБ), а величина потерь переключающего ферритового Y-циркулятора [7] составляет в прямом направлении менее 0,6 дБ при обратных потерях более 20 дБ в диапазоне 92 – 97 ГГц. Этот циркулятор выполняет функции вентиля при работе системы в обычном режиме радиометра и функции модулятора сигналов от двух идентичных антенн с различной поляризацией при работе в режиме радиометра-поляриметра.

После Y-циркулятора принятый сигнал попадает на смеситель с резонаторной камерой полного сечения волновода $1,2 \times 2,4 \text{ мм}^2$ [11], в которой расположен смесительный диод с барьером Шоттки бескорпусного типа.

В качестве гетеродина использован генератор Ганна с выходной мощностью около 1 мВт с возможностью механической перестройки в диапазоне частот 90 – 100 ГГц.

С выхода смесителя сигнал промежуточной частоты поступает на малошумящий предварительный усилитель и каскады УПЧ, которые выполнены на стандартных модулях «Огаста». Полоса пропускания узла УПЧ 1200 – 1700 МГц при коэффициенте шума около 1 дБ и коэффициенте усиления около 60 дБ.

К выходу ИФА подключен квадратичный детектор, с которого зашумленный НЧ сигнал частоты модуляции к устройству ADC и компьютеру.

Сотовая структура бескорпусного смесительного диода с барьером Шоттки, генераторный диод Ганна и широкополосный PIN модулятор с малым уровнем потерь изготовлены в НИИ ПП г. Томска (Россия). Остальные элементы СВЧ тракта были изготовлены на опытном производстве ИРЭ НАНУ и кафедре ПРЭСЛА, ХАИ (г. Харьков, Украина). Измеренная чувствительность радиометра 0.25К.

На рис. 3 показан внешний вид каждого из радиометров диапазона 40 ГГц (а) и 94 ГГц (б).

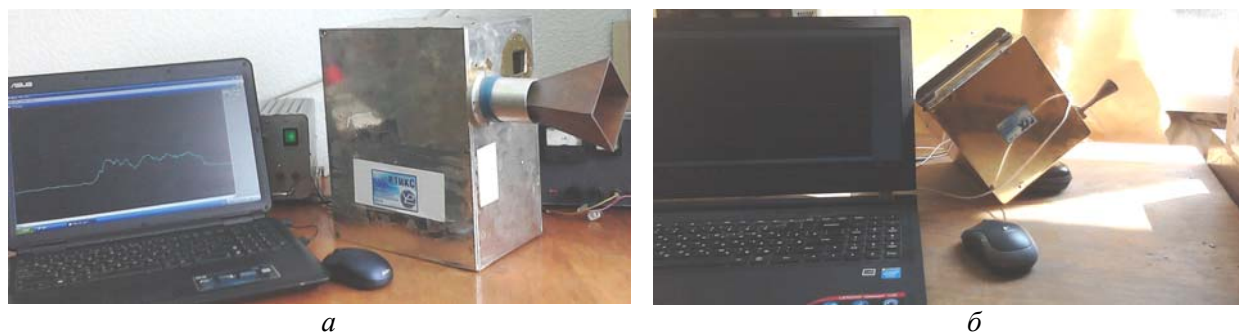


Рис. 3

В состав конечной НЧ части измерительного комплекса также входит микропроцессорное устройство для сбора и предварительной обработки измерительной информации. Съем данных осуществляется как с выхода квадратичного детектора, так и традиционно с выхода синхронного детектора радиометра. Первый режим используется для повышения оперативности варьирования параметрами интегрирования и законами модуляции (демодуляции) входного сигнала радиометра, а также для реализации режимов оптимальной обработки [15 – 17].

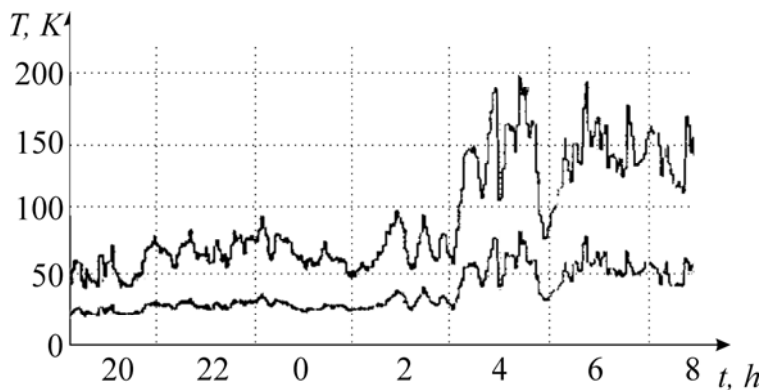


Рис. 4

Разработанный опытный образец измерительного комплекса успешно прошел лабораторные и натурные испытания. На рис. 4 представлен фрагмент записи изменения радиояркости неба на 94 ГГц (верхняя кривая) и 40 ГГц при прохождении фронтальной зоны облачности с 7 вечера до 8 часов утра. В [19] было показано, что представленные на этом рисунке данные о радиояркости неба позволяют восстановить динамику изменения значений полного вертикального ослабления в атмосфере, значения эффективной температуры капельной влаги в облачном покрове, а также значения водозапаса и влагозапаса облаков.

Цифровая часть радиометров

В комплексе предусмотрены следующие два канала цифровой обработки сигналов:

- особенность штатного режима цифровой обработки сигналов в обоих радиометрах в том, что для обеспечения задаваемой аппаратурными параметрами флуктуационной чувствительности используется 16^{ти} разрядный АЦП фирмы *Analog Device* типа *AD51115*, а источник опорного напряжения и встроенный усилитель позволяют измерять малые напряжения без ограничений на разрешение АЦП. Измерения могут проводиться с частотой до 800 SPS, а результаты измерения с АЦП по последовательному интерфейсу *I2C* поступают на микропроцессорный блок предварительной обработки. Разработанный интерфейс обеспечивает передачу данных на PC и формирование *Excel* таблицы с результатами измерений, что обеспечивает удобство накопления и последующей обработки полученных данных;

- тестовый режим (используется только на радиометре с центральной частотой настройки приемника 94 ГГц) предусматривает реализацию алгоритма обработки сигналов, отличающийся от используемого в классическом радиометре модуляционного типа [20].

Данный алгоритм, как доказано в работах [15–17], обеспечивает несмещенное оценивание параметров радиотеплового излучения в приемнике с нестабильным коэффициентом усиления и может быть представлен следующим образом:

$$T_A^o = (T_{ng}^o + T_n^o) \sum_{i=1}^I Q_i \left(\sum_{i=1}^I Z_i \right)^{-1} - T_n^o, \quad (1)$$

где $Q_i = m(t_i)u^2(t_i)$ – наблюдение на выходе синхронного детектора SD при условии, когда $m(t_i) = 1$; $Z_i = [1 - m(t_i)]u^2(t_i)$ – измерения на выходе SD при условии, когда $m(t_i) = 0$;

T_A° – температура антенны; T_{ng}° – температура генератора шума; T_n° – внутренняя шумовая температура, а $m(t_i)$ – цифровая функция модуляции (меандр, который принимает значения нуля или единицы); $u(t_i)$ – цифровое наблюдение. Оценки эффективных температур T_{ng}° и T_n° получают при калибровке радиометра.

Техническая реализация (1) выполнена в цифровом виде в FPGA (см. рис. 1). При этом наблюдения оцифровываются после SD (на вход SD подан сигнал в полосе 1,2 – 1,6 ГГц). Для оцифровки сигнала с выхода SD требуется низкая частота дискретизации, но несмотря на это, частота дискретизации АЦП выбрана с существенным запасом и равна 600 МГц (*Analog Device DL4A003*).

Методика измерений и восстановления значений затухания

Методика измерений предполагает непрерывную запись сигнала с заданным периодом усредненной выборки и периодической калибровкой радиометров. Процедура калибровки, от которой в значительной степени зависит точность определения контролируемых параметров атмосферы, имеет несколько вариантов. Выбор варианта калибровки зависит от решаемых задач и требований к точности измерений атмосферного поглощения или восстановления атмосферных параметров. Проведенное нами исследование показало, что наибольшая точность абсолютных измерений радиояркой температуры (менее 3 %) может быть достигнута при калибровке радиометра методом двух высокоэффективных согласованных нагрузок при охлаждении одной из них до температуры кипения жидкого азота (путем ее погружения в жидкий азот). Точность абсолютных измерений радиояркой температуры около 6 % может быть достигнута калибровкой радиометра по радиояркости зенита, величина которой может быть рассчитана по приземным метеоданным, например методом Лиоба [21]. Промежуточные этим значениям 3 – 6% точности можно получить, используя калибровку, которая основана на определении различий между суммой разностного сигнала от зенитного направления сложенного с разностью сигналов от зенита и направления 30° (от горизонта) и сигналом, принятым от согласованной нагрузки антенны, либо пользуясь классическим методом разрезов [22].

Восстановление значений полного вертикального ослабления атмосферой производится на основе измеренных значений радиояркой температуры неба в каждом отдельном канале. Для восстановления значений интегральных влаго- и водозапасов атмосферы, а также значений эффективной температуры облачного слоя используются данные синхронных двухчастотных измерений о величинах полного вертикального ослабления.

Величина полного вертикального атмосферного поглощения определяется на основании измеренных значений антенной температуры радиометров с использованием следующего выражения:

$$\alpha_{\text{total}}^{\lambda} = \frac{\ln \left[T_0 - (T_{\text{ant}} - T_{\text{bground}}) / (1 - \beta) \right] / (T_0 - T_c)}{\text{Sec} \vartheta} \quad (2)$$

где T_{ant} – измеренная радиометров антенная температура атмосферы; β – коэффициент рассеяния вне основного лепестка диаграммы направленности антенны; T_{bground} – эффективная температура фонового излучения принимаемого задними и боковыми лепестками диаграммы направленности антенны (экспериментально оцененные значения); T_c – реликтовое излучение космоса (2.75 К); ϑ – зенитный угол зрения; λ – длина волны (миллиметры); T_0 – усредненная температура атмосферы (определялась как $T_0 = bT^0$ где T^0 – температура приземного слоя воздуха, а b – коэффициент, зависящий от длины волны и времени года (получен из сезонного усреднения высотных профилей метеоданных). Мы используем $b = 0.98$ для лета и 0.96 для зимы в 3-миллиметровом диапазоне, и $b = 0.95$ для лета и 0.93 для зимы в 8-миллиметровом диапазоне).

Для восстановления значений содержания атмосферного водяного пара (Q) и жидкокапельной влаги (W) используем систему уравнений для 3- и 8-миллиметрового диапазонов

$$\alpha_{\text{total}} = \alpha_{\text{oxygen}}(\lambda) + \Phi(\lambda)Q + k(\lambda, T_0)W \quad (3)$$

где Φ и k – удельные коэффициенты поглощения в парообразной и жидкокапельной влаге атмосферы соответственно. В результате ее решения:

$$W = \frac{\alpha_{\text{total}}^3 - \alpha_{\text{oxygen}}^3 - B(\alpha_{\text{total}}^8 - \alpha_{\text{oxygen}}^8)}{(1 - B/A)k_3}$$

$$Q = \frac{\alpha_{\text{total}}^3 - \alpha_{\text{oxygen}}^3 - A(\alpha_{\text{total}}^8 - \alpha_{\text{oxygen}}^8)}{(1 - A/B)\Phi_3}$$

где $\alpha_{\text{oxygen}}^{3,8}$ – расчетная на основе метеоданных величина; $A = k_3/k_8$; $B = \Phi_3/\Phi_8$;

Как правило, коэффициент A принимает значения от 3 до 6 (в зависимости от температуры капельной влаги) а $B=6,8$ для нашей пары частот.

Использование представленной методики радиометрических измерений и обработки результатов дает возможность получить экспериментальные данные статистики изменчивости атмосферного затухания и оценок содержания облачной влаги для различных областей Украины. Точность получения величин вертикального атмосферного ослабления волн миллиметрового диапазона и знания параметров их пространственных, временных и сезонных вариаций, а также погодной, частотной, территориальной, микроклиматической изменчивости атмосферного ослабления в значительной степени определяют энергетическую и экономическую эффективность развертывания перспективных наземных и наземно-космических линий связи и сетей передачи мультимедийной информации при переходе от сантиметрового диапазона радиоволн [23, 24] к миллиметровому.

Заклучение

Разработан и изготовлен опытный образец двух частотного наземного измерительного комплекса диапазона 40 и 90 ГГц, обеспечивающий непрерывное измерение параметров атмосферы (полного вертикального поглощения в атмосфере, эффективной температуры, микроструктуры кристаллов и водозапаса облаков, общего содержания водяного пара атмосферы) практически в реальном масштабе времени.

Измерительный комплекс обеспечивает:

- измерение общего содержания водяного пара в столбе атмосферы (интегральное влагосодержание) с оцениваемой погрешностью метода менее 2кГ/м^2 ;
- измерение интегрального водозапаса облаков с оцениваемой погрешностью метода менее $0,05\text{кГ/м}^2$ (в интервале значений $0 - 1,5\text{кГ/м}^2$);
- измерение эффективной температуры облачного слоя с темпом выдачи данных около 300 с в диапазоне реальных температур капельной фракции и зависимостью оцениваемой погрешности от величины отрицательной температуры переохлажденных капель;
- идентификацию зон с кристаллической фракцией в облачном слое и возможностью морфологических оценок формы кристаллов.

При этом процедура измерения влаго- и водозапаса атмосферы являются основными, а процедуры измерения эффективной температуры облачного слоя и измерения поляризационных отличий радиояркости кристаллических зон облачности – вспомогательными, позволяющими повысить информативность основных каналов.

Установка таких комплексов на опорных аэрологических станциях системы гидромета Украины, с одной стороны позволит обеспечить непрерывность измерений, а с другой – возможность дополнительных калибровок с использованием радиозондовых данных. Применение таких двух- либо трехчастотных измерительных систем ММ ДВ также эффективно в научных задачах климатологии, в задачах исследования физики облаков. Использование

данной системы целесообразно и в прикладных задачах искусственного воздействия на облака, с целью выделения зон, наиболее перспективных для засева облаков при искусственной стимуляции либо предотвращении осадков.

По своим техническим параметрам и возможностям представленный радиометрический комплекс может быть использован также для определения кумулятивных функций атмосферного ослабления ММ радиоволн с учетом микроклиматических особенностей территории Украины, что является важным для прогнозирования параметров готовности перспективных наземных и наземно-космических линий связи ММ ДВ.

Список литературы: 1. Кутуза Б.Г., Данилычев М.В., Яковлев О.И. Спутниковый мониторинг Земли: Микро-волновая радиометрия атмосферы и поверхности. – ЛЕНАНД, 2016 г. – 336 с. 2. A.V. Antonov, Churilov V.P., Gerasimov Y.M., Karelin Y.V. and Ruzhentsev N.V. Observations of local sources of the Sun activity at 94 GHz with the radiotelescope RT-2 // Physics and Engineering of Millimeter and Sub-Millimeter Waves, 2001. The Fourth International Kharkov Symposium on, Kharkov, 2001, pp. 798-800, vol.2. 3. Tsopa A.I., Ivanov V.K., Leonidov V.I., Maleshenko Yu.I., Pavlikov V.V., Ruzhentsev N.V. and Zarudniy A.A. The research program of millimetric radio waves attenuation characteristics on perspective communication lines of UKRAINE // Proceedings of the XIII-th International Conference Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science (TCSET'2016), Lviv-Slavsko, Ukraine, February 23 – 26, 2016, pp. 638-642. 4. Leonidov V.I., Ivanov V.K., Maleshenko Yu.I., Pavlikov V.V., Ruzhentsev N.V., Tsopa A.I. and Zarudniy A.A. The Project of Joint Investigations of Millimetre Waves Propagations for Ukrainian Advanced 5G Communication Lines // The IX International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'16) : symp. proc., Kharkov, Ukraine, June 20–24, 2016. – G. – 8. pp. 1–4. 5. S. Salous et al. Millimeter-Wave Propagation: Characterization and modeling toward fifth-generation systems. [Wireless Corner] // in IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 58, no. 6, pp. 115-127, Dec. 2016. 6. Recommendation ITU-R P.530-12. Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems. 7. Blinov A. K., Boiko V. V., Kashkaryev D. V. et al. "Radiometer at 7 mm diapazon with quantum amplifier," Preprint #14, Radio Astronomy Institute of the USSR Academy of Sciences, Kharkiv, 1988, 46p. [in Russian]. 8. Ruzhentsev N.V. Complex Research of Parameters of Radiation of Axisymmetrical Antennas with Small Aperture at Millimeter Waves Band // Proc. of Int. Kharkov Symposium – Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW), June 2016, 4 pp. 9. Yesepkina N. A., Korol'kov D. V. and Pariyskii Yu. N. Radiotelescopes and passive radars. – Moscow : Nauka, 1973. – 416p. [in Russian]. 10. Ruzhentsev N. V. Radiometer without diplexer // Proc. of 21th Conference "Radio Astronomical Equipment", Yerevan, Oct. 1989, pp. 45-46 [in Russian]. 11. Ruzhentsev N.V. Compact 3mm wave band transceivers for technological radars and radiotelephone communication systems // Turkish Journal of Physics, vol. 20, no. 4, 1996, pp. 356-358. 12. Kokosov A. S., Yelenskiy V. G. Generator harmonics millimeter-wave-based Gunn diodes // Zarubezhnaya radioelektronika, 1987, №2. pp. 54-65 [in Russian]. 13. Barth H. A wideband backshort – fennable second harmonic Gunn oscillator // Digests of IEEE MTT-S Join International Microwave Symposium, 1981. – p. 334-337. 14. Pidlichii V.I. and Peskovatskii S.A. A broad-band low-noise Schotky diode full-height waveguide mixer from 80 to 115 GHz // International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2003, vol. 25, no. 1. – pp. 43-54. 15. Pavlikov V.V., Zhyla S.S. and Odokienko O.V. Structural Optimization of Dicke-Type Radiometer [Elektronik resource] // International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering, 12 – 14 October 2016. Kharkiv, Ukraine. – GRS-6. 16. Pavlikov V.V., Zhyla S.S., Odokienko A.V. and Antonov M.O. Radiometer with signal energies ratio // IEEE Radar Methods and Systems Workshop. (RMSW 2016) : proc. Intern. conf., 27-28 Sept., 2016, Kyiv, Ukraine,, pp. 99-102. 17. Pavlikov V.V. and Sobkolov A.D. The New Type of Chopper Radiometer, Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals. (UWBUSIS 2016) : proc. 8th Intern. conf., 5-11 Sept., 2016, Odesa, Ukraine, 2016, pp. 205-208. 18. Ruzhentsev N.V. and Kuzmenko Yu.A. Flare angle changes antenna of the millimeter wave band // International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1996, vol. 17, no. 4, pp. 779-784. 19. Ruzhentsev N.V. Peculiarities of vertical atmosphere absorption in the millimeter wave band // Radio Science. – vol. 38. – no. 3, 2003, 8043. – p. Mar 8-1. – pp. 8-7. 20. Руженцев Н.В. Вертикальное атмосферное ослабление радиоволн миллиметрового диапазона // Издательство LAMBERT Academic Publishing (Германия), 2015, 122 с. 21. Liebe H.J. MPM – an atmospheric millimeter waves propagation model // International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1989, vol.10, no 6, pp. 631-650. 22. Stepanenko V.D., Shchukin G. G., Bobyl'ov L. P. and Matrosov S. Yu. Radar in meteorology. – Leningrad, Gidrometizdat, 1987. – 283 p.[in Russian]. 23. Tsopa O.I., Strelnitskiy A.A. and Shokalo V.M. Approximate Model for Estimation of Efficiency and Noise Immunity of Branched Street and Corridor Wi-Fi and WiMAX Communication Channels // International journal «Telecommunication and Radio Engineering», Begell House, 2009, vol. 68(17), pp. 1511-1528. 24. Tsopa O.I., Strelnitskiy A.A., Strelnitskiy A.E. and Shokalo V.M. Prediction model of energy security for the systems of subscriber radio access with branched street and corridor communications channels // Radioelectronics and Communications Systems, Allerton Press, Inc., 2011, vol. 54, no. 2, pp. 61-67.