

## РАДИОФОТОННЫЙ ТРАКТ СИГНАЛОВ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ЧАСТОТЫ МНОГОЧАСТОТНОЙ МИКРОВОЛНОВОЙ РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

*И.Н. Ростокин, Е.В. Федосеева, Е.А. Ростокينا, И.Ю. Холодов,  
М.А. Матюков, Н.В. Кокуров*

Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО  
«Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых»,  
Российская Федерация, 602264, г. Муром, ул. Орловская, 23

**Аннотация.** В работе представлены результаты экспериментальных исследований вариантов построения трактов промежуточной частоты микроволновых радиометрических систем, основанных на традиционной схеме построения с использованием медных коаксиальных линий передачи сигналов промежуточной частоты микроволновых радиометрических приемников и перспективной радиофотонной волоконно-оптической линии передачи микроволновых сигналов с внутренней модуляцией. Целью работы является оценка возможности реализации радиофотонного тракта для передачи сигналов промежуточной частоты в составе перспективных микроволновых радиометрических систем дистанционного зондирования атмосферы. Задачи работы - анализ характеристик радиофотонных передающих и приемных модулей в составе тракта промежуточной частоты многочастотной микроволновой радиометрической системы дистанционного зондирования атмосферы в сравнении с коаксиальной радиочастотной линией передачи.

**Ключевые слова:** радиофотоника, многочастотные микроволновые радиометрические системы, дистанционное зондирование, радиофотонные тракты передачи микроволновых сигналов.

### Введение

Микроволновая радиометрия является средством пассивного дистанционного зондирования атмосферы и оценки ее метеопараметров по результатам измерений собственного радиотеплового излучения атмосферы, являющегося результатом теплового движения заряженных частиц.

Наибольший вклад в формирование радиотеплового излучения облачной атмосферы вносят кислород, водяной пар, жидкокапельные облака и осадки. На основе данных микроволновых радиометрических измерений в результате решения обратных задач оценивают метеопараметры атмосферы, в частности, влагозапас атмосферы и водозапас облаков, а также интенсивность выпадающих осадков, значительные вариации которых могут являться предикторами возникновения опасных метеорологических явлений.

Информация о радиоярких температурах атмосферы используется для оценки параметров облачности, вариаций полной массы водяного пара в атмосфере, для анализа синоптической обстановки, локализации зон выпадения осадков, а также для решения ряда других научно-прикладных задач.

Вариант структурной схемы многочастотной микроволновой радиометрической системы дистанционного зондирования атмосферы, с использованием элементов радиофотоники в тракте передачи промежуточной частоты, представлен на рисунке 1.

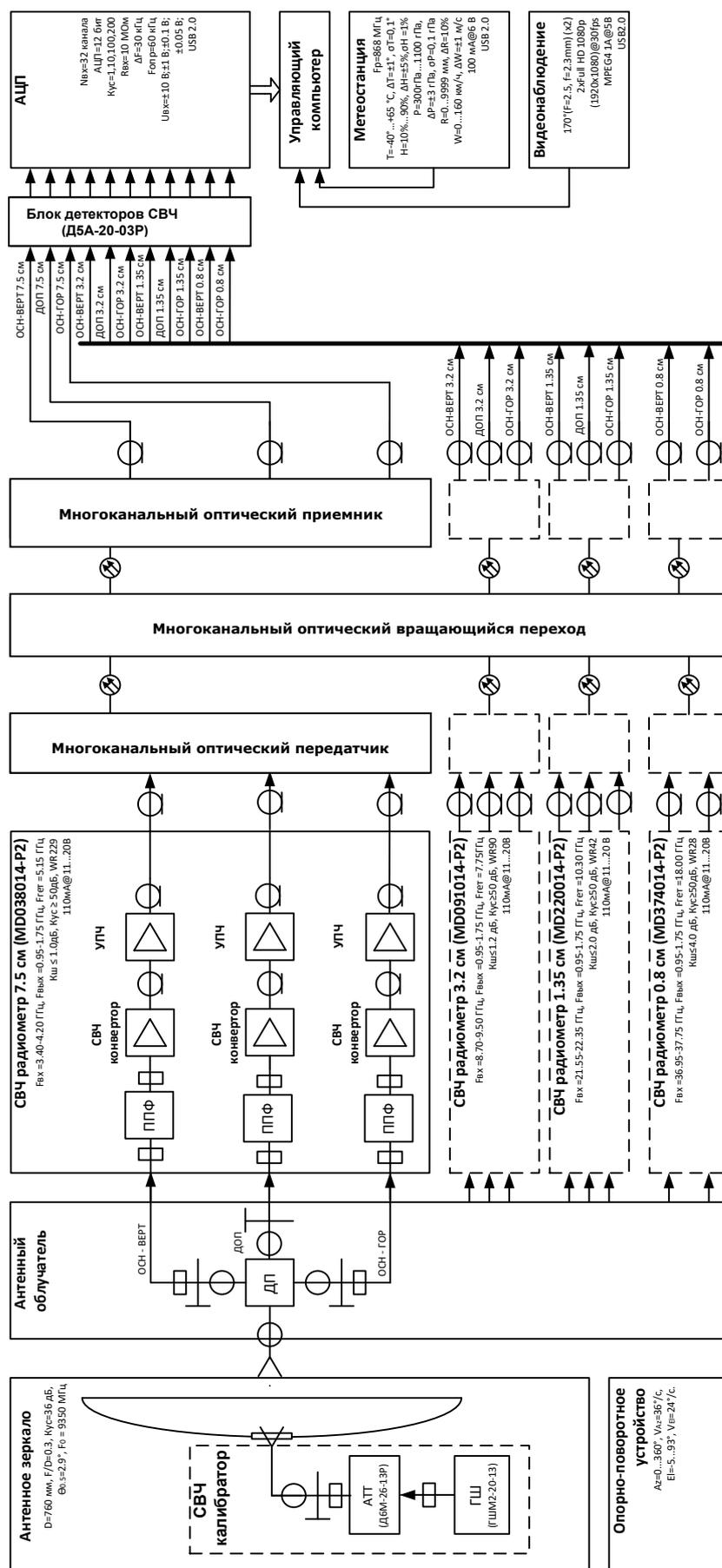


Рис. 1. Структурная схема многочастотной микроволновой радиометрической системы

Основные технические характеристики радиофотонной многочастотной микроволновой радиометрической системы приведены в таблице 1.

Таблица 1. Технические характеристики

Параметр	Значение			
1. Длина волны, $\lambda$ см	7.5	3.2	1.35	0.8
2. Радиометрическая чувствительность $\Delta T$ , при постоянном времени интегрирования $\tau = 1$ с	0.03	0.04	0.05	0.07
3. Полоса пропускания, $\Delta f$ МГц	800	1000	800	800
4. Шумовая температура приемника, $T_{ш\text{ пр}}$ °К	13	13	101	438
5. Коэффициент усиления приемника, $G$ дБ	60	60	53	50
6. Ширина диаграммы направленности по уровню -3 дБ, при ( $D = 1000$ мм, $F = 320$ мм) - мобильный вариант	5.07	1.82	0.91	0.5
7. Коэффициент усиления антенны, $K_{уc}$ дБ	31	40	46	50
8. Ширина диаграммы направленности по уровню -3 дБ, при ( $D = 2400$ мм, $F = 900$ мм) - стационарный вариант	2.13	0.76	0.38	0.2
9. Коэффициент усиления антенны, $K_{уc}$ дБ	39	48	54	60
10. Поляризация	H, V, $\Delta$	H, V, $\Delta$	H, V, $\Delta$	H, V

Каждый частотный измерительный канал многочастотной микроволновой радиометрической системы содержит три антенных выхода, формирующие следующие измерительные сигналы [1]:

- сигнал основного антенного канала, формирующего ДН антенны игольчатого типа на горизонтальной поляризации  $T_{осн\text{ гор}}$ ;

- сигнал основного антенного канала, формирующего ДН антенны игольчатого типа на вертикальной поляризации  $T_{осн\text{ верт}}$ ;

- сигнал дополнительного антенного канала, формирующего ДН антенны специальной формы, с минимальным приемом радиотеплового излучения в области главного лепестка ДН основного канала и адекватный основному антенному каналу прием мощности шумового излучения из угловой области  $T_{доп}$ .

Наличие двух основных измерительных каналов, принимающих радиотепловое излучение облачной атмосферы на двух ортогональных линейных поляризациях (горизонтальная и вертикальная), позволит производить оценку поляризационных характеристик радиотеплового излучения гидрометеоров атмосферы, что составляет основу дистанционного контроля интенсивности осадков, параметров распределения капель дождя по размерам, параметров пространственной структуры слоя дождя.

Направленные свойства дополнительного антенного канала должны удовлетворять следующим требованиям:

- дополнительный антенный канал должен иметь минимальный уровень принимаемой мощности излучения из угловой области главного лепестка ДН антенны основного измерительного канала, что обеспечит минимальные потери информационной составляющей антенной температуры;

- дополнительный антенный канал должен осуществлять адекватный основному антенному каналу прием мощности шумового излучения из угловой области, соответствующей области рассеяния ДН основного антенного канала, при этом степень адекватности ДН основного и дополнительного канала в области рассеяния будет задавать точность компенсации помеховых составляющих антенной температуры радиометрической системы.

На выходах антенного устройства каждого измерительного канала формируются минимум три выходных шумовых сигнала, которые при условии абсолютной поляризационной развязки измерительных каналов и изотропности ради шумового излучения, принимаемого из области рассеяния ДН основного антенного канала определяются следующими выражениями:

- выходной сигнал основного канала при приеме на горизонтальной поляризации

$$T_{\text{осн гор}} \sim k(T_{\text{гл гор}}(1 - \beta)\eta + T_{\text{бок}}\beta\eta + T_0(1 - \eta)) + T_{\text{ш пр}}, \quad (1)$$

- выходной сигнал основного канала при приеме на вертикальной поляризации

$$T_{\text{осн верт}} \sim k(T_{\text{гл верт}}(1 - \beta)\eta + T_{\text{бок}}\beta\eta + T_0(1 - \eta)) + T_{\text{ш пр}}, \quad (2)$$

- выходной сигнал дополнительного антенного канала

$$T_{\text{доп}} \sim k(T_{\text{бок}}\beta\eta + T_0(1 - \eta)) + T_{\text{ш пр}}. \quad (3)$$

Процедура компенсации помеховой составляющей выходного сигнала предполагает нахождение разности двух выходных сигналов, сигнала основного измерительного канала (на горизонтальной и вертикальной поляризациях) и дополнительного измерительного канала, в результате чего формируются два разностных сигнала

$$T_{\text{вых гор}} = T_{\text{осн гор}} - T_{\text{доп}} \sim kT_{\text{гл гор}}(1 - \beta)\eta, \quad (4)$$

$$T_{\text{вых верт}} = T_{\text{осн верт}} - T_{\text{доп}} \sim kT_{\text{гл верт}}(1 - \beta)\eta, \quad (5)$$

где  $\beta$  – коэффициент рассеяния антенны;  $T_{\text{гл}}$ ,  $T_{\text{бок}}$  – радиояркая температура среды соответственно в области главного лепестка и в области рассеяния ДН;  $\eta$  – КПД антенны;  $T_0$  – термодинамическая температура антенны;  $T_{\text{ш пр}}$  – шумовая температура микроволнового радиометрического приемника;  $k$  – коэффициент передачи микроволнового радиометрического приемника выходных сигналов антенны.

Согласно выражениям (4) и (5) при абсолютном выполнении требований к поляризационной развязке каналов и к направленным свойствам дополнительного антенного канала в выходных сигналах микроволновой радиометрической системы дистанционного зондирования облачной атмосферы отсутствуют составляющие, обусловленные собственными шумами микроволнового радиометра, а также приемом изменяющегося фонового шумового излучения через область рассеяния ДН антенны при проведении угломестных разрезов.

При условии конечной поляризационной развязки между основными каналами ортогональных линейных поляризаций, характеризуемой коэффициентом взаимной передачи  $k_{\text{пр}}$ , выходные сигналы определяются выражениями

$$T_{\text{вых гор}} = T_{\text{осн гор}} - T_{\text{доп}} \sim k(T_{\text{гл гор}} + k_{\text{пр}}T_{\text{гл верт}})(1 - \beta)\eta, \quad (6)$$

$$T_{\text{вых верт}} = T_{\text{осн верт}} - T_{\text{доп}} \sim k(T_{\text{гл верт}} + k_{\text{пр}}T_{\text{гл гор}})(1 - \beta)\eta, \quad (7)$$

разностный сигнал оценки поляризационного контраста равен

$$\Delta T_{\text{пр вых}} = T_{\text{осн гор}} - T_{\text{вых верт}} \sim k(1 - k_{\text{пр}})(T_{\text{гл верт}} + T_{\text{гл гор}})(1 - \beta)\eta. \quad (8)$$

Таким образом, ограничения на точность микроволновых радиометрических измерений, осуществляемых с помощью предложенного метода, реализующего пространственную селекцию информационного сигнала, определяется только степенью удовлетворения требованиям, предъявленным к направленным свойствам дополнительного антенного канала, т.е. минимально возможный уровень приема по угловой области главного лепестка ДН основного антенного канала и максимально возможная адекватность приема по области рассеивания обоих измерительных каналов.



Для практической оценки потерь ради шумового сигнала при прохождении радиочастотного и радиопотонного тракта передачи микроволновых сигналов был собран лабораторный стенд, представленный на рисунке 3.



Рис. 3. Состав радиопотонного тракта передачи сигналов промежуточной частоты многочастотной микроволновой радиометрической системы

Основой лабораторного стенда для испытания радиопотонной линии передачи СВЧ сигналов промежуточной частоты радиометрической системы являются радиопотонный передатчик MP-2350 TX и радиопотонный приемник MP-2350 RX фирмы "Microwave Photonic Systems, Inc.", внешний вид которых представлен на рисунке 4, технические характеристики приведены в таблицах 2 и 3 соответственно.



Рис. 4. Радиопотонные модули MP-2350-TX и MP-2350-RX

Радиопотонный передатчик MP-2350 TX имеет структурную схему, показанную на рисунке 5.

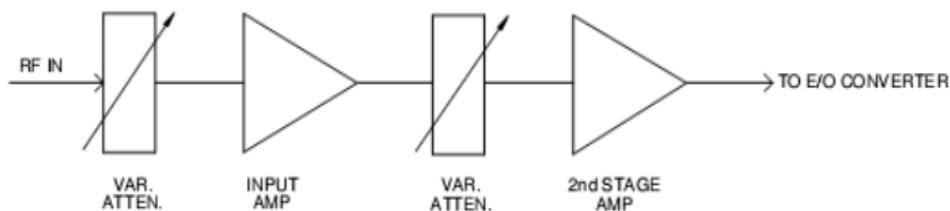


Рис. 5. Структурная схема радиопотонного передатчика MP-2350 TX

Как видно из схемы, передатчик имеет два регулируемых аттенюатора: входной и межкаскадный (расположенный между двумя каскадами усилителя). Пользовательский интерфейс управления позволяет регулировать оба аттенюатора.

Таблица 2. Технические характеристики радиофотонного передатчика MP-2350 TX

<b>Оптический канал</b>	
Рабочая длина волны	1310 или 1550 нм ± 2.0 нм
Уровень оптической мощности (мин)	+3.0 дБм ± 0.5 дБм
Допустимое обратное отражение (макс)	35 дБ
Классификация лазерных диодов	Класс 3А
<b>Радиочастотный канал</b>	
Полоса модуляции	1.0 МГц ... 3.5 ГГц
КСВН (мин)	2.0:1
1 дБ Уровень компрессии (мин)	+1.0 дБм
Входной уровень IP-3 (мин)	+13.0 дБм
Входной уровень повреждения	+15.0 дБм
Коэффициент шума (макс)	от 20 до 40 дБ (регулируемый) @ 2.0 дБ оптические потери

Радиофотонный приемник MP-2350 RX имеет структурную схему, показанную на рисунке 6.

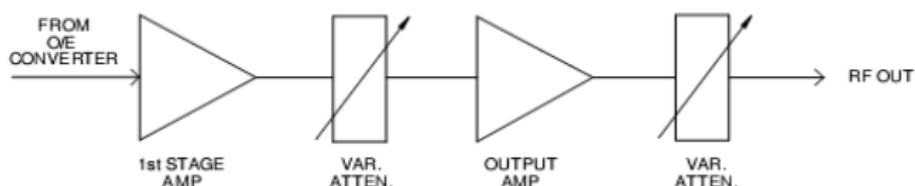


Рис. 6. Структурная схема приемника MP-2350 RX

Как и передатчик, приемник имеет два регулируемых аттенюатора (межкаскадный и выходной), которые могут быть настроены через интерфейс управления пользователя.

Таблица 3. Технические характеристики радиофотонного приемника MP-2350 RX

<b>Оптический канал</b>	
Рабочая длина волны	1200 нм ... 1600 нм
Входной уровень (макс)	+ 5 дБм
Входное обратное отражение	-55 дБ ... -63 дБ
Порог оптической неисправности	-12 дБм
<b>Радиочастотный канал</b>	
Полоса пропускания	1.0 МГц ... 3.5 ГГц
Усиление (мин)	28.0 дБ
1 дБ Уровень компрессии (мин)	+ 18.0 дБм
Коэффициент шума (макс)	3.0 дБ

После ввода команды "A" и нажатия клавиши "ENTER" пользовательский интерфейс (рисунок 7) покажет текущие параметры аттенюаторов и предложит изменить их значения.

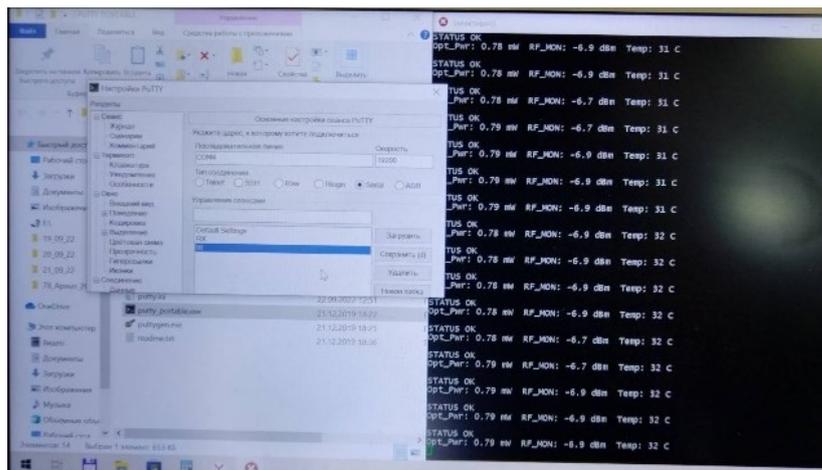


Рис. 7. Пользовательский интерфейс программы управления радиофотонным трактом передачи

В пакете состояния приемника обычно отображается оптическая мощность, регистрируемая детекторным блоком приемника, и внутренняя температура электроники приемника.

В качестве источника шумового сигнала используется модуль микроволнового генератора шума на M31305-4 2.210.121ТУ с установленным на его выходе волноводным аттенуатором от 0 единиц (0дБ) до 100 единиц (33дБ).

### Результаты экспериментальных исследований

В данном разделе представлены результаты экспериментальных исследований прохождения радиошумового сигнала от полупроводникового генератора шума на ЛПД M31305-4 по коаксиальному тракту промежуточной частоты (длина 33 м.) СВЧ радиометрической системы (рисунок 8), а также по радиофотонному тракту (длина 33 м.) передачи СВЧ сигналов (рисунок 9).

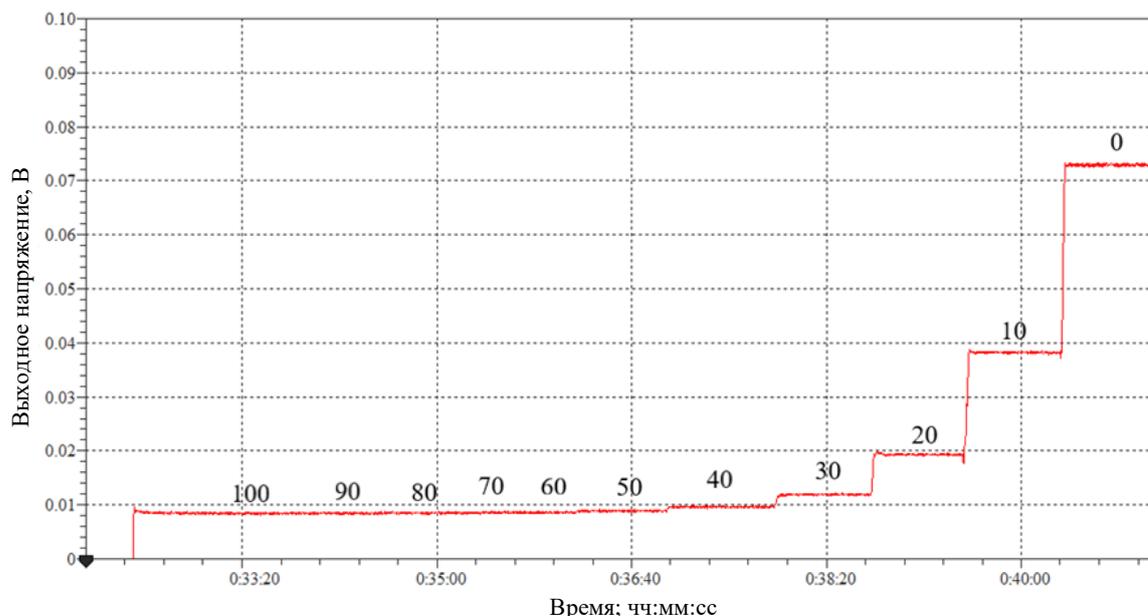


Рис. 8. Зависимость выходного напряжения радиометрической системы от уровня генератора шума при прохождении через коаксиальный тракт длиной 33 м

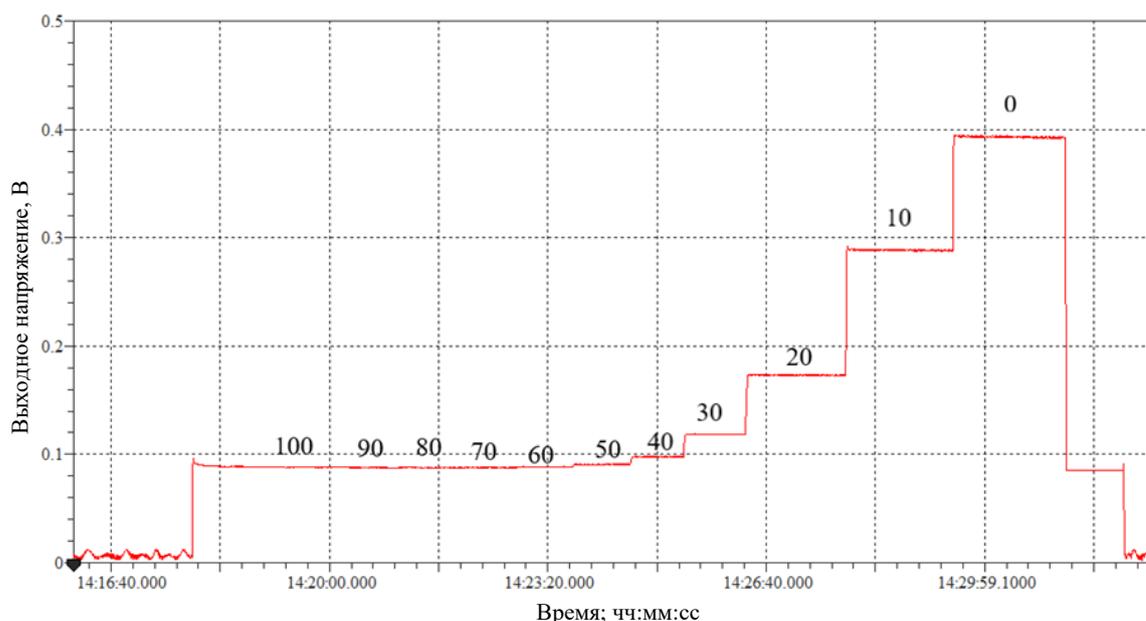


Рис. 9. Зависимость выходного напряжения радиометрической системы от уровня генератора шума при прохождении через радиофотонный тракт длиной 33 м

Обобщенные результаты экспериментальных исследований выходного напряжения микроволновой радиометрической системы при прохождении излучения полупроводникового генератора шума через коаксиальный и радиофотонный тракты передачи промежуточной частоты представлены в таблице 4.

Таблица 4. Сравнительные характеристики экспериментальных исследований

Ослабление аттенюатора, ед	Ослабление аттенюатора, дБ	Выходное напряжение радиометрической системы, В	
		Коаксиальная линия передачи	Радиофотонная линия передачи
0	0	0.072	0.39
10	3	0.038	0.28
20	5	0.019	0.18
30	10	0.012	0.12
40	15	0.01	0.10
50	20	0.009	0.09
60	25	0.0088	0.088
70	28	0.0086	0.086
80	30	0.0084	0.084
90	33	0.0082	0.082
100	35	0.008	0.08

Приведенные в таблице 4 данные свидетельствуют о значительном улучшении характеристик тракта передачи сигнала промежуточной частоты микроволновой радиометрической системы на основе радиофотонной приемопередающей аппаратуры, что в конечном итоге приведет к улучшению флуктуационной пороговой чувствительности радиометрической системы в целом.

## Выводы

Для снижения потерь сигналов промежуточной частоты микроволновой радиометрической системы, а, следовательно, и повышения ее чувствительности предложено введение в состав системы устройств радиофотоники.

Для оценки эффективности перехода на оптическую линию связи многочастотного радиометра с АЦП, проведены экспериментальные исследования по включению в состав системы оптического приемно-передающего модуля (радиофотонный передатчик МР-2350 ТХ и радиофотонный приемник МР-2350 RX) с оптическим кабелем длиной (33 м) аналогичной радиочастотному кабелю, по которому передается радиосигнал на промежуточной частоте от радиометров до квадратичного детектора и АЦП.

Для адекватности сравнения характеристик радиочастотного и оптического канала измерения проводились при подаче на вход многочастотного модового разделителя шумового сигнала от полупроводникового генератора шума.

Полученные результаты показали существенное снижение потерь сигнала, достигающее 10 дБ, что позволило рассмотреть перспективу перевода многочастотной микроволновой радиометрической системы на оптический канал связи с необходимостью выбора и обоснования схмотехнического и конструктивного решения передачи всех выходных сигналов радиометров на промежуточной частоте, сосредоточенных в одной частотной области спектра.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-19-00378, <https://rscf.ru/project/21-19-00378/>.*

## Литература

1. Ростокин И.Н. Многочастотный микроволновый радиометрический метод обнаружения и контроля опасных атмосферных метеоявлений, устойчивый к изменяющимся условиям измерений / И.Н. Ростокин // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. - 2018. - № 1 (37). - С. 6-21.
2. Urick Vincent J. - Jr. Fundamentals of microwave photonics / Urick Vincent J. - Jr., McKinney Jason D., Williams Kate J. - M.: Technosphere, 2016. - 376 p.
3. Boreysho A.S. Possibility and application of all-weather lidar-radio sensing complexes / A.S. Boreysho, A.A. Kim, M.A. Konyaev et al.// Journal of Physics: Conference Series, 2020.- V.1499, 012025. DOI: 10.1088/1742-6596/1499/1/012025
4. Морозов О.Г., Ильин Г.И. Амплитудно-фазовая модуляция в радиофотонных системах// Вестник ПГТУ. Сер: Радиотехника и инфокоммуникационные системы. - 2014. - № 1. - С.6 - 42.
5. Морозов О.Г. Программно-аппаратный анализатор спектра радиофотонных устройств для измерения доплеровского сдвига частоты и его знака / О.Г. Морозов, Г.А. Морозов, Г.И. Ильин и др. // Вестник ПГТУ. Серия: Радиотехника и инфокоммуникационные системы. - 2022. - № 1 (53). - С. 65-80.
6. Fedoseeva E.V. Multi-band microwave radiometric sensing of remote rain zones / E.V. Fedoseeva, I.N. Rostokin, G.G. Shchukin, E.A. Rostokina // Journal of Physics: Conference Series. 2020 Russian open scientific conference «Modern problems of remote sensing, radar, wave propagation and diffraction»" (MPRS R WPD), 2020, doi:10.1088/1742-6596/1632/1/012012.

## **RADIOPHOTONIC PATH OF INTERMEDIATE FREQUENCY SIGNALS OF MULTI-FREQUENCY MICROWAVE RADIOMETRIC SYSTEM FOR REMOTE SENSING OF THE ATMOSPHERE**

*I.N. Rostokin, E.V. Fedoseeva, E.A. Rostokina, I.Y. Kholodov,  
M.A. Matyukov, N.V. Kokurov*

Murom Institute of Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletov  
23, Orlovskaya, Murom, 602264, Russian Federation

**Annotation.** The paper presents the results of experimental studies of variants of construction of intermediate frequency paths of microwave radiometric systems based on the traditional scheme of construction using copper coaxial transmission lines of intermediate frequency signals of microwave radiometric receivers and promising radiophotonic fiber-optic transmission line of microwave signals with internal modulation. The aim of the work is to evaluate the possibility of realization of the radiophotonic path for transmission of intermediate frequency signals as a part of perspective microwave radiometric systems for remote sensing of the atmosphere. The objectives of the work are to analyze the characteristics of radiophotonic transmitting and receiving modules as part of the intermediate frequency path of a multi-frequency microwave radiometric system for remote sensing of the atmosphere in comparison with a coaxial radio-frequency transmission line.

**Keywords:** radiophotonics, multi-frequency microwave radiometric systems, remote sensing, radiophotonic microwave signal transmission paths.

Статья отправлена в редакцию 24 июля 2023 г.