

В. А. Кабанов*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины**12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина*E-mail: kabanov@ire.kharkov.ua

НАСТРОЙКА И КАЛИБРОВКА РАДИОРЕФРАКТОМЕТРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПРЕЛОМЛЕНИЯ АТМОСФЕРЫ

Наиболее точные сведения о диэлектрическом строении атмосферы могут быть получены с помощью радиорефрактометров. Эти приборы незаменимы при измерении тонкой структуры коэффициента преломления исследуемой среды. Сведения, полученные с их помощью, особенно важны при исследовании условий тропосферного распространения радиоволн. Несмотря на преимущества рефрактометров по сравнению с метеорологическими измерениями, актуальной остается задача их калибровки. Приведено краткое описание разработанного автором СВЧ-рефрактометра, на примере которого показана возможность настройки и калибровки прибора с помощью стандартных метеорологических измерений без использования специальной эталонной камеры в условиях закрытого помещения. Ил. 8. Библиогр.: 7 назв.

Ключевые слова: коэффициент преломления, индекс рефракции, рефрактометр, резонатор, калибровка, метеорологические измерения.

Свойства атмосферы как среды распространения радиоволн определяются коэффициентом преломления n , который связан с диэлектрической проницаемостью соотношением $n = \sqrt{\epsilon}$. Величина n даже у поверхности Земли превышает единицу примерно на 0,0003, поэтому на практике чаще пользуются так называемым индексом рефракции:

$$N = (n - 1)10^6.$$

Численные значения индекса рефракции называют N -единицами (N -ед.).

Индекс рефракции может быть определен косвенным способом путем измерения метеопараметров атмосферы (давления, влажности и температуры) и последующим расчетом по известным формулам. Для прямого измерения N служат приборы, называемые радиорефрактометрами или просто рефрактометрами. Наиболее точными из них являются СВЧ-рефрактометры.

Из литературных источников известен ряд моделей таких приборов. В основном они представляют различные модификации двух типов рефрактометров, впервые разработанных Крейном и Бирнбаумом [1, 2].

В рефрактометре Крейна измеряется разность резонансных частот измерительного (открытого) и эталонного (закрытого) резонаторов. Каждый резонатор является элементом, определяющим частоту осциллятора Паунда [3]. Рефрактометр сконструирован таким образом, что резонансные частоты полостей несколько различны. Результирующая разностная частота является центральной, относительно которой измеряются отклонения, вызванные изменениями показателя преломления вещества, заполняющего открытый резонатор.

Настройка и калибровка рефрактометров связана с определенными трудностями. Прежде всего, это необходимость создания эталонной

камеры, в которой показатель преломления мог бы меняться в широких пределах в зависимости от давления, влажности и температуры, а также измерения этих величин с большой точностью. Значительно усложняет настройку прибора наличие вакуумированного или герметизированного эталонного резонатора, который требует учета влияния внешнего давления, а следовательно, использования барокамеры.

Существенно улучшить эксплуатационные качества рефрактометра позволяет отказ от эталонного резонатора и отсутствие трудностей, связанных с его эксплуатацией (поддержание и контроль вакуума или герметизация и устранение влияния влажности воздуха). В качестве опорного канала можно использовать СВЧ-генератор, синхронизированный кварцевым резонатором. Такое решение было реализовано в малогабаритном рефрактометре [4], на примере которого ниже будет показана возможность настройки и калибровки прибора без применения специальных эталонных камер в условиях закрытого помещения.

В предложенной схеме рефрактометра измерительный резонатор совместно с системой автоматической подстройки частоты (АПЧ) выделен в отдельный узел, являющийся выносным датчиком. Это позволило значительно уменьшить габариты, вес и потребляемую мощность выносного блока, а использование для связи с наземной частью СВЧ-канала сделало выносной датчик полностью автономным.

Однако в таком варианте нет возможности (как при моноблочной конструкции двух резонаторов) частично компенсировать в разностном сигнале температурные изменения резонансных частот резонаторов. Поэтому в новой схеме рефрактометра пришлось найти способы повышения температурной стабильности измерительного резонатора.

Существующие системы термокомпенсации оказались малоэффективны для открытого измерительного резонатора в связи с тем, что все они обладают большим динамическим разбалансом при резком изменении внешней температуры (например, при быстром подъеме рефрактометра). Это связано с неодновременным нагревом или охлаждением отдельных элементов системы термокомпенсации и корпуса резонатора вследствие их различной массы, теплопроводности и места расположения. Этот недостаток в значительной мере присущ и моноблочной конструкции двухрезонаторного рефрактометра.

Автором разработан термостабильный резонатор с расположением термокомпенсирующих элементов внутри его стенок, позволивший более чем на порядок снизить температурный коэффициент частоты и способный работать даже при резких изменениях окружающей температуры [5].

1. Краткое описание прибора. Рабочая частота рефрактометра 9,3 ГГц. Он состоит из двух блоков: выносного датчика и блока приема, обработки и регистрации данных. Внешний вид прибора приведен на рис. 1.

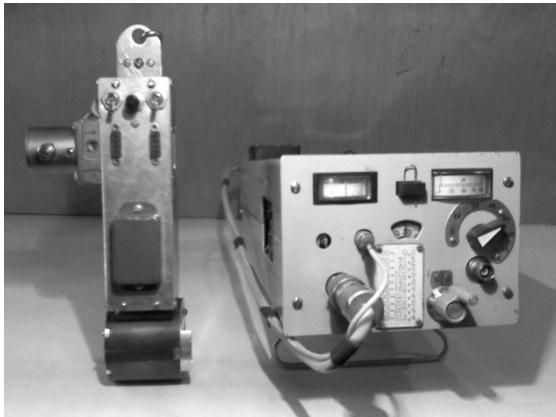


Рис. 1. Однорезонаторный рефрактометр

Структурная схема выносного датчика рефрактометра представлена на рис. 2.

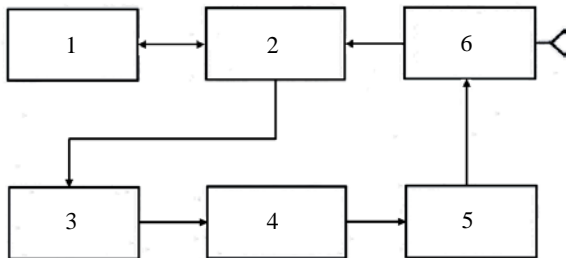


Рис. 2. Структурная схема выносного датчика рефрактометра: 1 – открытый резонатор; 2 – СВЧ-дискриминатор; 3 – усилитель постоянного тока; 4 – СВЧ-генератор; 5 – развязывающий вентиль; 6 – направленный ответвитель

Колебания СВЧ-генератора через развязывающий вентиль и направленный ответвитель поступают на дискриминатор схемы АПЧ, основным элементом которой является открытый резонатор. В отличие от рефрактометра Крейна, в нем применен более простой дискриминатор с использованием стоячих волн [6]. Выходной сигнал дискриминатора усиливается усилителем постоянного тока (УПТ) и служит для управления частотой генератора. Основная часть мощности колебаний генератора, несущих информацию о коэффициенте преломления среды, направляется в передающую антенну.

Наземное устройство (рис. 3) обеспечивает прием сравнительно слабого сигнала выносного датчика со значительных расстояний при малых апертурах передающей и приемной антенн. Последнее требование диктуется сложностью работы, например, с шаром-зондом при узких диаграммах направленности. Приемник имеет широкую полосу, чтобы осуществлять прием сигнала во всем возможном диапазоне его изменений по частоте (1 МГц на 100 N-ед.).

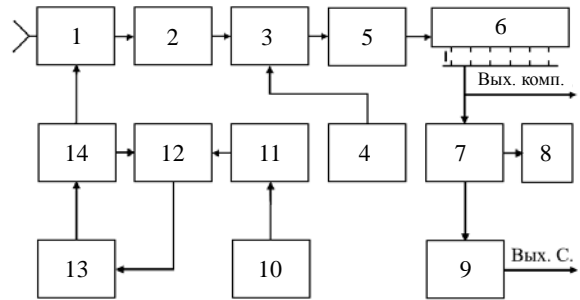


Рис. 3. Структурная схема блока приема и регистрации данных рефрактометра: 1 – СВЧ-смеситель; 2 – усилитель разностной частоты; 3 – смеситель; 4 – измерительный генератор; 5 – усилитель низкой частоты; 6 – делитель частоты; 7 – частотомер; 8 – индикатор; 9 – усилитель постоянного тока; 10 – кварцевый генератор; 11 – усилитель высокой частоты; 12 – СВЧ-смеситель системы ФАП; 13 – усилитель постоянного тока; 14 – СВЧ-генератор

Для реализации надежной связи между блоками приемный тракт выполнен по супергетеродинной схеме. В качестве сигнала гетеродина на входной СВЧ-смеситель подаются колебания эталонной частоты. Высокая стабильность эталонной частоты (порядка 10^{-7}) достигается за счет синхронизации СВЧ-генератора, выполненного на диоде Ганна, гармониками кварцевого генератора. Для этого используется система фазовой автоподстройки частоты. Кварцевый генератор помещен в термостат.

Выделенные на входном смесителе колебания разностной частоты, несущие информацию о коэффициенте преломления среды, после усиления поступают на второй смеситель, где с помощью перестраиваемого измерительного генера-

тора сигнал переносится в область низких частот и далее с помощью делителя частоты – в область звуковых частот для последующего измерения частотомером. Шкала измерительного генератора отградуирована непосредственно в N -единицах и соответствует с калибровочной поправкой измеряемому значению индекса рефракции при нулевых биениях на выходе смесителя. Для определения показаний прибора в пределах установленной шкалы используется индикатор, расположенный на передней панели блока и также отградуированный в N -единицах.

Переключение пределов измерений производится изменением коэффициента деления делителя, максимальная величина которого равна 256, а промежуточные значения – 128, 64, 32, 16 и 8. Эти коэффициенты соответствуют различным по чувствительности шкалам прибора 160, 80, 40, 20, 10 и 5 N -ед. При таком построении измерительной схемы частотомер имеет один диапазон измерений (0...5,6 кГц), что упрощает его конструкцию и настройку, а также повышает точность измерений при переключении шкал.

Благодаря тому, что сигнал, несущий информацию о коэффициенте преломления среды, в конечном итоге переносится в область звуковых частот, для регистрации показаний прибора возможен широкий выбор звукозаписывающих устройств. Это позволяет использовать для визуализации, регистрации и дальнейшей обработки результатов измерений практически любой компьютер без дополнительного преобразования сигнала. При этом для подключения используется звуковая плата компьютера.

Рефрактометр имеет следующие параметры: абсолютная погрешность измерений $\pm 1 N$ -ед. (определяется точностью калибровки), флуктуационная чувствительность – не хуже 0,1 N -ед., частотный диапазон измеряемых флуктуаций коэффициента преломления – 0...150 Гц. Масса выносного датчика – 1,2 кг, с антенной и источником питания – 1,6 кг. Масса наземного блока – 5,5 кг.

Выносной датчик рефрактометра питается от автономного источника напряжением 12...17 В и потребляет мощность не более 4 Вт. Питание блока обработки и регистрации данных осуществляется от сети 220 В или аккумуляторов.

При использовании соответствующих антенн СВЧ-канал связи позволяет устанавливать выносной датчик на больших расстояниях (десятки километров) от приемного пункта. При необходимости для передачи сигнала между датчиком и приемным блоком может быть использован кабель.

2. Методика настройки и калибровки рефрактометра. Основным элементом СВЧ-рефрактометра является высокочастотный резонатор, внутренняя полость которого через отверстия сообщается с окружающей средой. Резонансная

частота измерительного резонатора функционально связана с коэффициентом преломления (индексом рефракции) заполняющего его воздуха. С изменением коэффициента преломления воздуха резонансная частота резонатора будет изменяться согласно соотношению:

$$Df/f_0 = -Dn.$$

Так как $DN = Dn \cdot 10^6$, то изменению индекса рефракции на 1 N -ед. соответствует изменение резонансной частоты $Df = f_0 \cdot 10^{-6}$.

Диапазон возможных изменений резонансной частоты измерительного резонатора (связанных с изменением коэффициента преломления воздуха) составляет несколько сотых процента от центральной резонансной частоты, поэтому с высокой степенью точности зависимость резонансной частоты от индекса рефракции в этом диапазоне можно считать линейной.

Если отградуировать шкалу рефрактометра непосредственно в N -ед., согласно соотношению 1 N -ед. соответствует изменению резонансной частоты $Df = f_0 \cdot 10^{-6}$, то достаточно произвести привязку показаний прибора к абсолютному значению индекса рефракции в любой точке шкалы. При этом показания прибора будут соответствовать истинным значениям во всем диапазоне измерений. Поэтому отпадает необходимость во время калибровки прибора создавать параметры среды, соответствующие всему заявленному диапазону измерений, что существенно упрощает процесс калибровки.

Градуировка шкалы рефрактометра выполняется один раз при настройке прибора, а последующие калибровки будут заключаться в сдвиге всей шкалы прибора на определенную во время калибровочных измерений величину.

Хотя точность рефрактометра значительно превышает точность определения индекса рефракции метеорологических методами, но последние остаются практически единственным способом для привязки показаний рефрактометра к абсолютному значению N . Это связано как с отсутствием эталонных приборов в этой области измерений, так и возможностью проведения последующих калибровок прибора простыми стандартными методами в натуральных условиях.

Следует учесть, что такие факторы, как старение резонатора, небольшие механические повреждения резонаторов и других узлов, разборка и сборка при ремонте, замена отдельных деталей, требуют проведения дополнительных калибровок прибора. В реальных условиях эксплуатации рефрактометра наиболее просто осуществить такую калибровку с помощью стандартных метеорологических измерений. Тем более что такие измерения в большинстве случаев обеспечивают

необходимую точность и не требуют дорогостоящего оборудования.

Величина N выражается через метеорологические параметры атмосферы следующим образом:

$$N = 77,6 \frac{P}{T} + 3,73 \cdot 10^5 \frac{e}{T^2},$$

где T – абсолютная температура воздуха; P и e – атмосферное давление и парциальное давление водяных паров в миллибарах.

Точность измерения различных параметров по-разному влияет на точность определения N . Так, например, ошибка величиной $\pm 1 N$ -ед. может быть вызвана ошибками измерения температуры $\pm 0,8^\circ\text{C}$, давления воздуха $\pm 3,7$ мбар, водяного пара $\pm 0,22$ мбар. Эти цифры свидетельствуют о необходимости особенно тщательного измерения влажности. При использовании психрометра с термометрами, позволяющими определять температуру с точностью $0,1^\circ\text{C}$, оптимальная ожидаемая точность измерения давления водяного пара составляет $0,2$ мбар. Следовательно, ошибки при измерении влажности ограничивают точность определения коэффициента преломления величиной, примерно равной $\pm 1 N$ -ед. [7].

Для испытания рефрактометра и определения его функциональных возможностей не обязательно иметь специальные дорогостоящие термостатированные шкафы и барокамеры, в которых можно обеспечить необходимые условия для проведения измерений. Большинство испытаний можно провести в условиях изолированного помещения. Для контроля метеорологических параметров воздушной среды служат стандартные метеорологические измерения с последующим расчетом индекса рефракции. Стационарные условия позволяют достичь максимально возможной точности метеоизмерений. Можно провести несколько измерений и, определив среднее значение, повысить точность определения абсолютного значения индекса рефракции.

При подключении рефрактометра к компьютеру на его звуковую карту поступает сигнал в виде меандра, в частоте которого заложена информация об индексе рефракции атмосферы.

В качестве программного обеспечения можно использовать программу компьютерного самописца *PowerGraph*, которая позволяет визуализировать показания рефрактометра на экране монитора, производить обработку результатов измерений, а также программно реализовать такой узел рефрактометра как частотомер. При этом имеется возможность вводить практически любые калибровочные коэффициенты, что удобно при настройке рефрактометра. Интерфейс программы *PowerGraph*, настроенной под рефрактометр, представлен на рис. 4. Слева по вертикали приве-

дены значения индекса рефракции, фиксируемые рефрактометром непосредственно в N -ед., а по горизонтальной оси – текущее время.

Часть графика левее вертикальной метки соответствует установившемуся режиму закрытого помещения, а часть правее метки – показывает изменения при открывании окна.

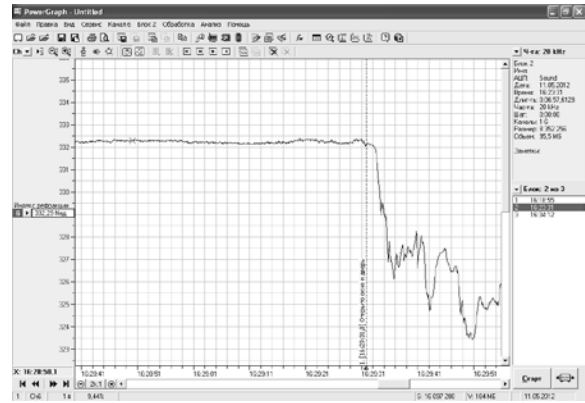


Рис. 4. Интерфейс программы *PowerGraph*, настроенной под рефрактометр

3. Проверка температурных параметров выносного датчика. Наибольший вклад в температурную нестабильность показаний рефрактометра вносит выносной датчик из-за входящих в его состав элементов и вследствие его расположения непосредственно в изменчивой измеряемой среде.

Основными элементами, определяющими температурную нестабильность выносного датчика, являются резонатор и электронная схема АПЧ, включающая в себя СВЧ-дискриминатор на диодах и УПТ.

Проверку температурных параметров выносного датчика можно выполнить целиком или отдельными узлами. Целесообразно вначале проверить стабильность электронной части схемы без резонатора. Это в дальнейшем позволит оценить вклад резонатора и проверить работу системы термокомпенсации, элементы которой расположены в стенках корпуса резонатора и таким образом компенсируют ошибки измерений, связанные с его температурным режимом.

Электронную схему датчика можно проверить, заменив резонатор поглощающей нагрузкой. В таком варианте из-за отсутствия отраженной от нагрузки волны в волноводе установится режим бегущей волны, аналогичный случаю точной настройки частоты генератора на резонансную частоту резонатора в рабочем режиме. Напряжение на диодах дискриминатора будет одинаковым; сигнал ошибки равен нулю.

Нагревая или охлаждая датчик и измеряя изменения напряжения дискриминатора на выходе УПТ, можно определить влияние электронной

схемы датчика на показания рефрактометра. Зная крутизну характеристики дискриминатора и коэффициент усиления УПТ, напряжение можно пересчитать в ошибку измерений, выраженную в N -ед. В этих измерениях нет необходимости контролировать состояние окружающей среды, что упрощает процесс испытаний.

График, иллюстрирующий влияние электронной схемы датчика без резонатора на показания рефрактометра представлен на рис. 5.

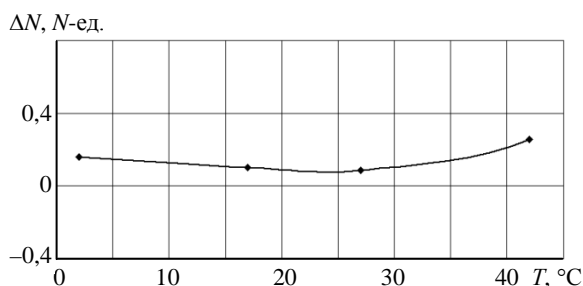


Рис. 5. Влияние электронной схемы выносного датчика на показания рефрактометра при изменении температуры

В нашем случае при изменении температуры выносного датчика на $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ показания рефрактометра изменяются на $0,2 N$ -ед. Эти цифры свидетельствуют о том, что в рабочем диапазоне температур влиянием электронной схемы выносного датчика можно пренебречь.

Для проверки температурной стабильности резонатора и настройки системы термокомпенсации нужно в условиях установившегося режима закрытого помещения производить контактный нагрев резонатора. В приведенных испытаниях нагрев осуществлялся с помощью алюминиевой пластины, плотно облегающей корпус резонатора с внешней стороны и нагреваемой специальным резистором. Вся конструкция, кроме боковых крышек с отверстиями для воздуха, покрыта теплоизоляцией. Через резонатор вентилятором, установленным на датчике рефрактометра, продувался воздух. Это позволило избежать ошибок измерений, связанных с нагревом воздуха непосредственно в резонаторе. Ввиду малой мощности, необходимой для нагрева резонатора, этот процесс практически не влияет на коэффициент преломления в объеме помещения. Температура резонатора контролируется цифровым термометром, датчик которого вставлен в специальное гнездо в корпусе резонатора.

Чтобы обеспечить необходимую точность настройки системы термокомпенсации изменения показаний рефрактометра, связанные с нагревом или охлаждением резонатора (при отсутствии термокомпенсации), должны намного превышать естественные вариации индекса рефракции в помещении. Как показали измерения, в установившемся режиме изменения индекса рефракции в

закрытом помещении длительное время находятся в пределах $1 N$ -ед., а изменения, связанные с нагревом некомпенсированного резонатора из инвара, составляют $1...2 N$ -ед./ $^{\circ}\text{C}$. При нагревании резонатора на $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ показания рефрактометра могут измениться на $25...50 N$ -ед. В таких условиях можно с достаточной точностью проверить и настроить систему термокомпенсации.

На рис. 6 и 7 представлены графики температурной зависимости показаний рефрактометра с резонатором без термокомпенсации и с системой термокомпенсации соответственно.

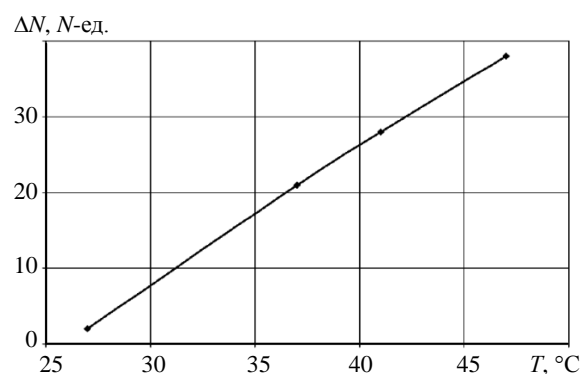


Рис. 6. Зависимость изменений показаний рефрактометра от температуры резонатора без термокомпенсации

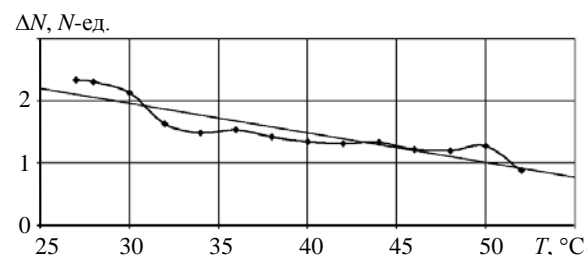


Рис. 7. Зависимость изменений показаний рефрактометра от температуры резонатора с термокомпенсацией

Из графиков следует, что изменение показаний рефрактометра с резонатором без термокомпенсации составляет $1,75 N$ -ед./ $^{\circ}\text{C}$, а с системой термокомпенсации — $0,05 N$ -ед./ $^{\circ}\text{C}$. Следует заметить, что на график (рис. 7) все-таки накладываются небольшие естественные изменения индекса рефракции в помещении, однако они не оказывают существенного влияния на результаты проводимых измерений. Таким образом, предложенная система температурной компенсации уменьшает ошибку измерений, связанную с изменением температуры резонатора, примерно в 35 раз, что свидетельствует об ее эффективности.

Сравнивая графики рис. 6 и 7, мы видим не только большую разницу в крутизне, но и противоположный ход зависимостей. Это говорит о некоторой перекомпенсации температурной зависимости резонатора. Систему можно подкорректировать изменением длины компенсирующих

элементов. Однако для большинства измерений достигнутая стабильность вполне приемлема, а более глубокая настройка системы на столь малом уровне вряд ли целесообразна.

Достигнутый температурный коэффициент частоты резонатора позволяет не вводить дополнительные поправки перед каждым измерением, а при больших изменениях температуры (например, зима–лето) просто еще раз провести калибровку.

Более точная калибровка рефрактометра может быть осуществлена путем многократных параллельных рефрактометрических и метеорологических измерений. Пример таких измерений представлен в Excel-таблице на рис. 8.

№ оп.	P	t	t'	N _M	N _P	N _M -N _P	N _M -N _P (кор.)
1	737,9	22,9	12	287,20	288,4	-1,20	-0,86
2	739	21,8	10,2	280,01	280,4	-0,39	-0,05
3	748,7	22,6	11,9	291,02	291,4	-0,38	-0,04
4	748,7	22,4	11,95	292,14	292,4	-0,26	0,08
5	750	21,45	11,4	292,58	292,9	-0,32	0,02
6	750	21,5	12,95	303,00	303,4	-0,40	-0,06
7	750,4	19,4	9,7	289,70	289,4	0,30	0,64
8	750,8	22	15,7	321,47	321,4	0,07	0,41
9	750,7	20,2	10,1	289,20	288,9	0,30	0,64
10	746,9	21,6	11	288,38	289,4	-1,02	-0,68
11	751,2	23,7	13,4	297,81	298,4	-0,59	-0,25
12	751	24	13,6	297,98	298,4	-0,42	-0,08
13	751	24,2	13,8	298,61	298,7	-0,04	0,30
14	746,1	25,25	15,6	306,11	307,0	-0,89	-0,55
15	746,1	25,4	15,7	306,27	307,3	-1,03	-0,69
16	747,1	25,7	16,4	310,72	311,0	-0,28	0,06
17	746,9	24,2	15	306,04	306,0	0,04	0,38
18	746	26,2	16,2	306,87	307,5	-0,63	-0,29
19	746	25,4	15,8	306,99	306,8	0,19	0,53
20	746,1	25	15	302,63	302,9	-0,27	0,07
21	748	22,6	14,9	312,05	312,5	-0,45	-0,11
22	748	22,9	15	311,59	312,0	-0,41	-0,07
23	748,7	21,4	12,4	299,16	298,6	0,56	0,90
24	741	24,8	14,4	297,47	297,4	0,07	0,41
25	741	25,8	14,8	296,49	297,6	-1,09	-0,75
				Ср. знач.	Ср. знач.	Ср. знач.	Дисп.
				299,66	300,00	-0,34	0,21
							Ст. откл.
							0,47

Рис. 8. Фрагмент Excel-таблицы для регистрации показаний приборов и вычисления индекса рефракции

В предпоследнем столбце показана разность значений индекса рефракции, полученных из метеорологических измерений и измеренных рефрактометром ($N_M - N_P$). Среднее значение этой разности равно $-0,34 N$ -ед. Это величину можно считать систематической ошибкой измерений рефрактометра, и ее следует учесть при калибровке прибора. Скорректированные значения разности ($N_M - N_P$) представлены в последней графе таблицы. Расхождение значений N , полученных различными способами в отдельных опытах, не превышает $1 N$ -ед., а стандартное отклонение равно $0,47 N$ -ед. Различие показаний связано в основном с точностью метеорологических измерений, которая в оптимальных условиях составляет $\pm 1 N$ -ед.

4. Оценка флуктуационной чувствительности рефрактометра. Флуктуационная чувствительность рефрактометра ограничивается его собственными шумами. Измерить собственные шумы рефрактометра можно, проведя измерения с закрытым резонатором. Иллюстрация результатов измерений представлена на рис. 9.

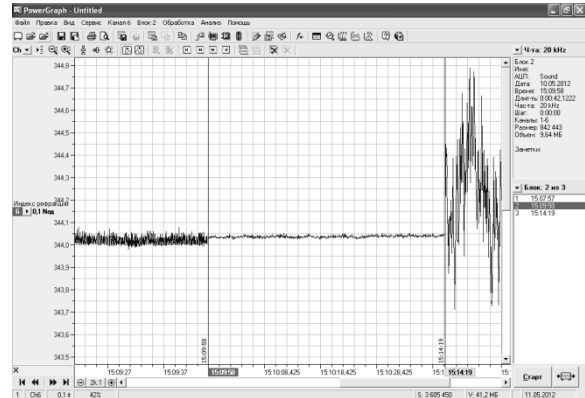


Рис. 9. Собственные шумы рефрактометра

Первая часть графика соответствует шумам рефрактометра при полосе выходного фильтра 100 Гц. Из рисунка видно, что размах флуктуаций составляет $\sim 0,05 N$ -ед., а рассчитанное стандартное отклонение $\sigma = 0,0097 N$ -ед.

Вторая часть графика соответствует полосе фильтра 10 Гц. В этом случае размах примерно равен $0,015 N$ -ед., а стандартное отклонение $0,0043 N$ -ед.

Для сравнения третья часть графика иллюстрирует показания рефрактометра с открытым резонатором в условиях закрытой комнаты.

Выводы. Настройка и калибровка рефрактометра с помощью стандартных метеорологических измерений обеспечивает необходимую точность калибровки в условиях закрытого помещения без применения дорогостоящего оборудования.

Испытания показали эффективность предложенной системы термокомпенсации [5], позволившей снизить температурный коэффициент частоты резонатора до величины $- 0,05 N$ -ед./ $^{\circ}C$ с возможностью еще более точной настройки.

Собственные шумы рефрактометра существенно ниже заявленной флуктуационной чувствительности прибора $0,1 N$ -ед.

Библиографический список

1. Crain C. M. Apparatus for rekording fluctuations in the refractive index of the atmosphere at 3.2 centimeter wavlength / C. M. Crain // Rev. Sci. Instr. – 21, N 5. – 1950. – P. 456–457.
2. Birnbaum G. A rekording mikrowave refraktometer / G. Birnbaum // Rev. Sci. Instr. – 21, N 2. – 1950. – P. 164–176.
3. Pound R. V. Electronic frequency stabilization of microwave oscillators / R. V. Pound // Rev. Sci. Instr. – 17, N 11. – 1946. – P. 490–505.

4. Кабанов В. А. Структура коэффициента преломления атмосферы и диагностика условий распространения УКВ над морем: дис. ...канд. ф.-м. наук. / В.А. Кабанов; Ин-т радиофизики и электрон. АН УССР. – Х., 1996. – 161 с.
5. А. с. 1415286 СССР, МклЗ НОІ Р7/06. Термостабильный резонатор / В. А. Кабанов. – Опубл. 8.04.1988.
6. Бычков С. И. Стабилизация частоты генераторов СВЧ / С. И. Бычков, Н. И. Буренин, Р. Т. Сафаров. – М.: Сов. радио. – 1962. – 376 с.
7. Бин Б. Р. Радиометеорология / Б. Р. Бин, Е. Дж. Даттон; пер. с англ. под ред. А. А. Семенова. – Л.: Гидрометео-издат, 1971. – 363 с.

Рукопись поступила 08.04.2016.

V. A. Kabanov

SETUP AND CALIBRATION OF THE RADIOREFRACTOMETER FOR MEASUREMENT OF THE ATMOSPHERIC REFRACTIVE INDEX

The most accurate information on the dielectric structure of the atmosphere can be obtained by radiorefractometers. These devices are essential when measuring a fine structure of the refractive index of the medium under investigation. The information obtained through them is particularly important in studies of tropospheric radio propagation conditions. Despite the advantages of refractometers compared with meteorological measurements, the task of calibration remains important. A brief description of a

microwave refractometer developed by the author is presented. It shows the ability to set up and calibrate the instrument using standard meteorological measurements without a special reference chamber in a closed room.

Key words: refractive index, refractometer, resonator, calibration, meteorological measurements.

В. О. Кабанов

НАСТРОЮВАННЯ ТА КАЛІБРУВАННЯ РАДІОРЕФРАКТОМЕТРА ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТА ЗАЛОМЛЕННЯ АТМОСФЕРИ

Найбільш точні відомості про діелектричну будову атмосфери можуть бути отримані за допомогою радіорефрактометрів. Ці прилади незамінні при вимірюванні тонкої структури коефіцієнта заломлення досліджуваного середовища. Відомості, що отримані за їх допомогою особливо важливі для дослідження умов тропосферного поширення радіохвиль. Незважаючи на переваги рефрактометрів у порівнянні з метеорологічними вимірюваннями, актуальним залишається завдання їх калібрування. Наведено короткий опис розробленого автором НВЧ-рефрактометра, на прикладі якого показано можливість настроювання та калібрування приладу за допомогою стандартних метеорологічних вимірювань без використання спеціальної еталонної камери в умовах закритого приміщення.

Ключові слова: коефіцієнт заломлення, індекс рефракції, рефрактометр, резонатор, калібрування, метеорологічні вимірювання.