

УДК 551.513:550.385.21

КАЛИБРОВКА ФАЗОВОГО УГЛОМЕРА ПРИ НАБЛЮДЕНИЯХ МЕТЕОРНЫХ ПОТОКОВ

А.М. Степанов, А.Н. Фахрутдинова, Д.В. Мамедов, К.А. Магдеев

Аннотация

Рассматривается возможность калибровки фазового угломерного устройства метеорологического радара по результатам наблюдений метеорных потоков. Приводится пример регистрации метеорного потока Геминид и определения экваториальных координат его радианта. Показано, что регулярные метеорные потоки, такие, как Геминиды, можно использовать для калибровки фазового угломера метеорологического радара.

Ключевые слова: метеорный след, атмосфера, скорость ветра, электромагнитная волна, калибровка фазового угломера.

1. Измерение угловых координат зеркальных точек метеорных следов

Свойство метеорных следов зеркально отражать радиоволны используется, применяя методы радиолокации метеорных следов, для определения скорости ветра и направления ветровых движений в верхней атмосфере, а также для исследования распределения метеорной материи в околосолнечном пространстве. Однако кратковременность существования метеорного следа и случайный характер его положения в пространстве требуют высокой оперативности и однозначности в принятии решений при вычислении его угловых координат. В настоящее время наибольшее распространение получил фазовый метод измерения угловых координат метеорных следов, который основан на использовании антенн (A_1, A_2), разнесенных между собой на расстояние d , называемое базой (рис. 1).

Электромагнитная волна с плоским фронтом, отраженная метеорным следом, наводит в антеннах угломера сигналы, сдвинутые по фазе на величину θ , которая зависит от угла прихода радиоволн. В соответствии с рис. 1 разность фаз сигналов θ на входах антенн A_1A_2 будет равна

$$\theta = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \alpha = 2\pi D \sin \alpha, \quad (1)$$

где λ – рабочая длина волны угломера; d – длина базы; D – относительная длина базы, выраженная в длинах волн; α – угол между радиус-вектором цели (в нашем случае – зеркальной точкой M на метеорном следе) и плоскостью Q , нормальной к базе угломера. Из (1) следует, что при базах $D > 0.5$ имеет место неоднозначность в определении угла цели. Так как измеренные угломером разности фаз θ находятся в пределах $(0 + 2\pi)$, то формулу (1) можно записать иначе:

$$\theta + 2\pi k = 2\pi D \sin \alpha, \quad (2)$$

где

$$k = \text{int}(D \sin \alpha), \quad (3)$$

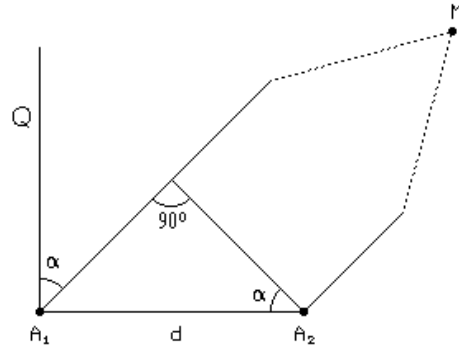


Рис. 1. Фазовый метод определения угла направления на метеорный след; A_1, A_2 – антенны фазового угломера; d – база угломера; M – зеркальная точка на метеорном следе; α – угол цели; Q – плоскость, нормальная к базе угломера

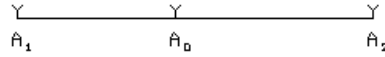


Рис. 2. Схема размещения антенн одномерного фазового угломера; A_1, A_0, A_2 – антенны фазового угломера

Здесь k (целая часть от выражения в скобках) определяет номер «области неоднозначности», или число «потерянных оборотов» фазы. Значение угла α определяется из (2) и (3):

$$\alpha = \arcsin \left(\frac{\theta + 2\pi k}{2\pi D} \right). \quad (4)$$

Дифференцируя (1), найдем:

$$d\alpha = \frac{d\theta}{2\pi D \cos \alpha}, \quad (5)$$

откуда видно, что точность измерения угла цели $d\alpha$ повышается с увеличением длины базы D . Для получения однозначного измерения угла α можно использовать дополнительную базу длиной $D_0 = 0.5$. При этом угломер с «малой» базой D_0 обеспечивает однозначность, а «большие базы» – необходимую точность измерения угла α . Возможный вариант расположения антенн приведен на Рис. 2.

Здесь большие базы образованы антеннами $(A_1, A_0), (A_0, A_2), (A_1, A_2)$, а малая база длиной 0.5λ получается из разности двух больших баз:

$$D_{0.5} = D_2 - D_1 = 0.5. \quad (6)$$

Конструкции антенных полей угломеров, предназначенных для метеорных исследований, чаще всего построены по схеме, представленной на рис. 3.

Такой угломер состоит из двух одномерных взаимно перпендикулярных угломеров, образованных приемными антеннами (A_{A1}, A_{A0}, A_{A2}) и (A_{B1}, A_{B0}, A_{B2}) . Базы угломера $da1, da2$ (A-базы) ориентированы в широтном направлении, а базы $db1, db2$ (B-базы) – в меридиональном [1, 2]. Размеры баз угломера выбираются, исходя из требований к необходимой точности определения углов цели (5). На A- и B-базах этого угломера измеряются соответственно углы α и β направлений на метеорный след. Определение горизонтальных координат метеорного следа методом решения сферических треугольников иллюстрирует рис. 4. Здесь N, E, S, W –

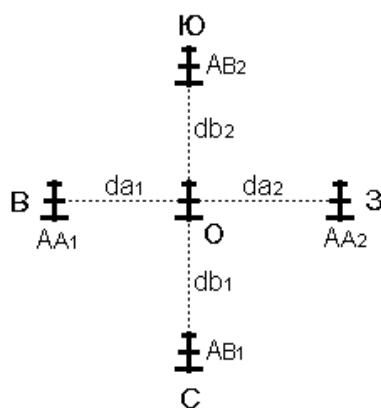


Рис. 3. Схема размещения антенн двухмерного фазового угломера; приемные антенны меридиональной (A_{A1}, A_{A0}, A_{A2}) и широтной (A_{B1}, A_{B0}, A_{B2}) баз угломера; da_1, da_2 (A-базы) и db_1, db_2 (B-базы) угломера

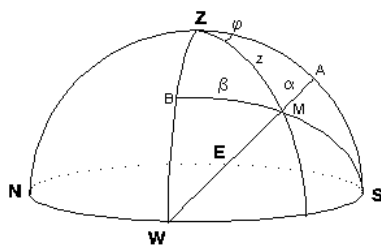


Рис. 4. Схема определения горизонтальных координат метеорного следа методом сферической тригонометрии

направления на страны света; Z — зенит наблюдателя; α, β — углы направлений на метеорный след (углы цели); z (зенитный угол) и ϕ (азимут метеора) представляют горизонтальные координаты метеорного следа. Для сферических треугольников ZAM и ZMB (рис. 4) можно записать уравнения:

$$\frac{\sin \phi}{\sin \alpha} = \frac{90^\circ}{\sin z}, \quad (7)$$

$$\frac{\sin(90^\circ - \phi)}{\sin \beta} = \frac{90^\circ}{\sin z} \quad (8)$$

и определить горизонтальные координаты метеорного следа:

$$\phi = \arctg \left(\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \right), \quad (9)$$

$$z = \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \alpha + \sin^2 \beta} \right). \quad (10)$$

В реальных условиях на точность измерения фаз принимаемых сигналов оказывают влияние собственные шумы приемников и эфирные шумы. Все это приводит к ошибкам измерения горизонтальных координат зеркальных точек метеорных следов.

2. Использование метеорных потоков для калибровки фазовых угломеров

Для оценки точности измерений угловых координат метеорных следов необходимо знание систематических погрешностей измерений фазы на базах интерферометра. Фазометрическое устройство располагают обычно в помещении на некотором удалении от антенн угломера и соединяют с ними кабельной линией. Для определения углов цели необходимо знать значения фаз принятого сигнала непосредственно на входах антенн. В реальных условиях фазометрическое устройство измеряет фазы сигналов, претерпевших задержки в кабельных линиях, в приемниках и в самом фазометре. Фазовые задержки к тому же являются переменными величинами – на них влияют изменения температуры окружающей среды и нестабильность аппаратных задержек. Процедура калибровки угломера заключается в определении величин фазовых задержек в приемных каналах. Далее эти величины используются в качестве калибровочных поправок для приведения измеренных значений фаз сигналов к входам антенн. Обычно применяемые способы калибровки радиопеленгаторов основаны на использовании или наземных «искусственных целей», или калибровочных сигналов с известной фазой, подаваемых непосредственно на входы антенн. Наиболее точная калибровка фазового угломера осуществляется по удаленным искусственным целям, положение которых в пространстве можно отслеживать специальными приборами с достаточной высокой точностью. В качестве таких целей могут быть использованы различные летательные аппараты, например шары-зонды, самолеты. Проведение облета антенн фазового интерферометра с помощью летательных аппаратов технически сложно. Поэтому окончательная проверка точности определения угловых координат проводилась нами по наблюдениям метеорных потоков путем сравнения известных из литературы радиантов потоков со значениями радиантов, вычисленными на основе измеренных координат отражающих точек на метеорных следах [1, 2]. При этом радианты потоков вычислялись методом, предложенным в работе [3], с использованием идеи и методики графического представления – метода Джонса–Мортонна [4], реализованного в работе [5]. Данный метод определения радиантов основывается на свойстве зеркальности отражения радиосигнала от метеорных следов, вследствие которого отражающие точки потоковых метеоров концентрируются вблизи большого круга на небесной сфере, полюсом которого служит радиант потока (рис. 5).

Процедура определения радианта предусматривает следующие этапы:

- вычисление горизонтальных координат зеркальных точек (7)–(10) и преобразование их в экваториальные;
- проецирование зеркальных точек в экваториальной системе координат на вспомогательную плоскость (Q), касательную к небесной сфере в точке северного полюса (P) [4]. В результате такого преобразования проекции точек (X_i, Y_i), принадлежащих потоковым метеорам с радиантом (R), группируются, образуя на графике «точечные прямые» (L) (рис. 5);
- применение процедуры распознавания точечных графических объектов – выделение радиантов.

На рис. 6 приведен график проекций зеркальных точек на плоскость (Q), касательную к небесной сфере в точке северного полюса, в период действия потока Геминид, наблюдаемых 12:12 (22:00) – 13:12 (06:00) 1989 г. на радиолокационном комплексе КГУ-М5. На приведенном рисунке точки, соответствующие потоковым метеорам, образуют «точечную прямую», которая заметно выделяется на фоне

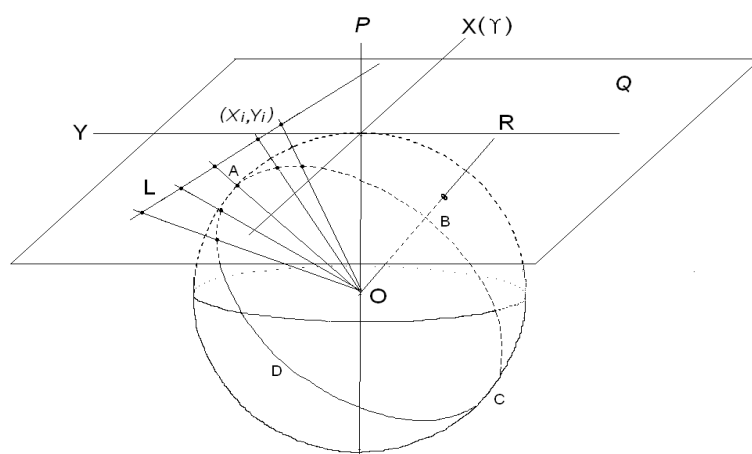


Рис. 5. Графическая иллюстрация применения метода Джонса – Мортон при определении экваториальных координат радианта метеорного потока

точек, принадлежащих спорадическим метеорам. Параметры нормального уравнения этой прямой (ϕ и r) в соответствии с рис. 6 определяют экваториальные координаты радианта метеорного потока (α , δ), которые вычисляются по формулам:

$$\alpha = \phi + 180^\circ, \quad (11)$$

$$\delta = \arctg r, \quad (12)$$

где r – нормаль, проведенная из начала координат к «точечной прямой»; ϕ – угол, отсчитываемый от точки весеннего равноденствия до нормали r . По результатам измерений было установлено, что наибольшая концентрация точек для метеоров радианта Геминид наблюдалась в области небесной сферы диаметром 0.25° . Экваториальные координаты центра этой области были приняты за координаты среднего радианта метеорного потока.

Для калибровки угломера следует выбирать интенсивные потоки с малым разбросом радианта σ_p . С этой точки зрения можно использовать поток Геминид, для которого $\sigma_p = 0.2^\circ$ [6]. Исключить субъективный фактор при выделении радиантов метеорных потоков в методе Джонса – Мортон можно, применив алгоритм распознавания образов, осуществляющих идентификацию «точечных» прямых. Для решения задачи был выбран метод неточечных преобразований, основанный на сравнении точечного графического объекта с эталоном посредством вычисления их дискретной функции взаимной корреляции [7, 8]. Этот метод можно применять на плоскости (рис. 5, 6) и на сфере непосредственно в экваториальной системе координат [5]. Для этого небесная сфера разбивается на элементарные участки одинакового размера. Изменяя шаг разбиения сферы, можно исследовать область радиации с различной степенью детализации. Затем для каждого зарегистрированного метеора на небесную сферу накладывается линия возможных радиантов. Так как направления на зеркальную точку и радиант взаимноперпендикулярны, то этой линией будет дуга большого круга. При этом необходимо учитывать, что радиант должен находиться выше линии горизонта. Вдоль траектории этой дуги производится суммирование в ячейках памяти, соответствующих элементарным участкам сферы. В процессе выполнения операции на сфере образуются кластеры – локальные максимумы функции взаимной корреляции (рис. 7). Центры наибольших из этих кластеров определяют координаты радиантов метеорных потоков. На рис. 7

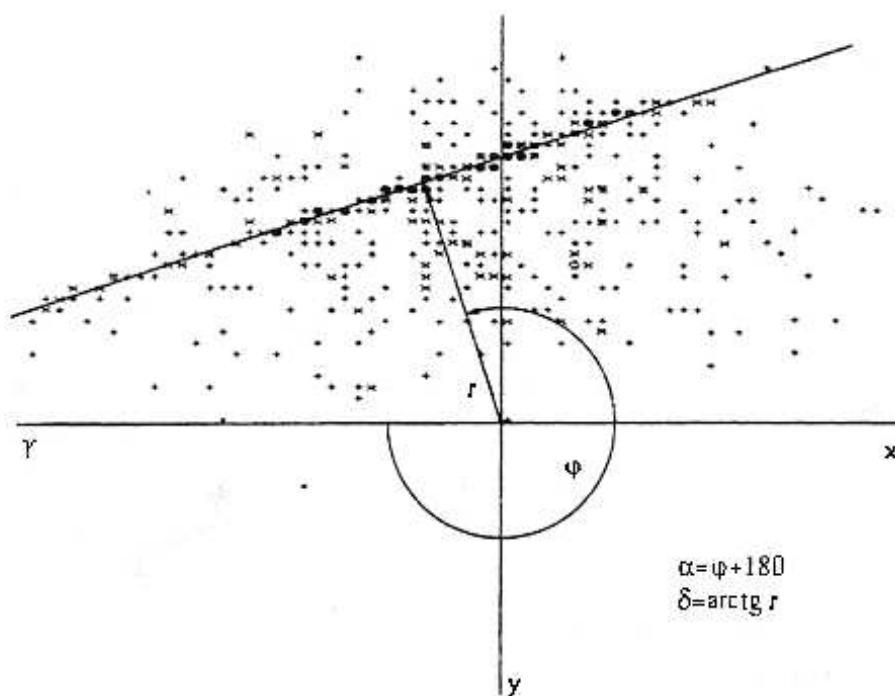


Рис. 6. Проекция зеркальных точек, зарегистрированных в период действия потока Геминид, на плоскость (Q): $+$ – одиночная точка; \times , $*$, \bullet – наложение 2, 3, 4 и более точек; γ – точка весеннего равноденствия; α – прямое восхождение и δ – склонение радианта метеорного потока

представлена копия экрана компьютера с изображением развертки координатной сферы, на которой построена нормированная функция взаимной корреляции, вычисленная для 300 отражающих точек, полученных по результатам наблюдения потока Геминид 12 декабря 2005 г. на метеорном радаре КГУ-М2. Начало системы координат совмещено с точкой весеннего равноденствия. Кластер радианта Геминид (на рис. 7 он отмечен стрелкой) хорошо выделяется на фоне спорадических метеорных радиантов. Координаты центра кластера принимаем за координаты наблюдаемого радианта.

На рис. 8 приведен график изменения значений координат радианта Геминид в зависимости от долготы Солнца λ_C , вычисленные по измерениям в Казани в 1988, 1989 гг. Горизонтальная ось на рисунке показывает λ_C ; вертикальная ось – прямое восхождение α и склонение δ радианта в градусах.

Как видим из рис. 8, результаты, полученные в Казани, показывают стабильный ход α и δ в зависимости от λ_C , хорошо согласующийся с аналогичной зависимостью, полученной в Харькове. Результаты измерений по наблюдениям в Казани в 1989 г. совпадают с измерениями 1988 г. (табл. 1)

3. Определение радианта потока Геминид 2005 г. в Казани

Для проведения расчетов координат положений зеркальных точек на метеорных следах была выполнена калибровка фазового угломера. Методика калибровки разработана авторами и представлена в работе [10]. В основе предложенной калибровки лежит статистический анализ полученного массива проведенных фазовых

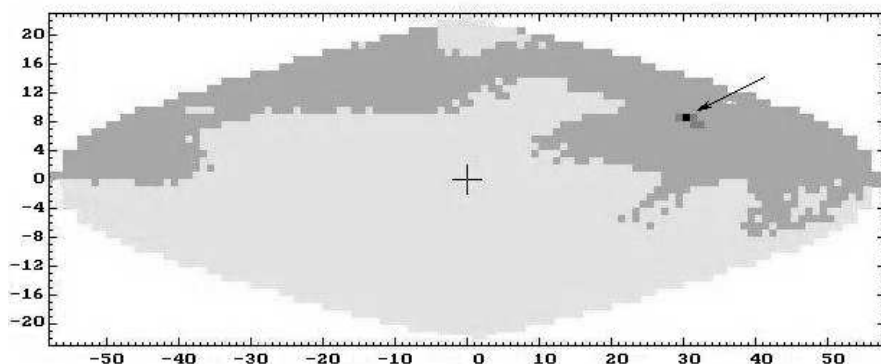


Рис. 7. Вид экрана компьютера при выделении радианта потока Геминид. На шкалах графика нанесена разметка: номер пояса и номер сектора участка небесной сферы

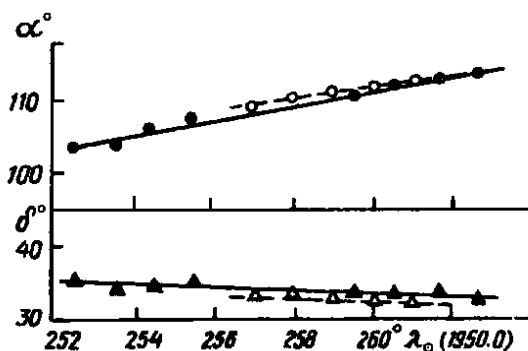


Рис. 8. Изменение экваториальных координат Геминид за время наблюдения потока. Координаты потока исправлены с учетом эффектов притяжения и вращения Земли и приведены к эпохе 1950.0. На рисунке приведены результаты наблюдений в Казани в 1988 г.: ● – прямое восхождение, ▲ – склонение радианта потока. Результаты, полученные в Харьковском политехническом институте [9]: ○ – прямое восхождение, △ – склонение радианта потока

наблюдений и выполненных расчетов координат зеркальных точек. Для расчета угловых координат зеркальных точек на метеорных следах статистическим методом калибровки был применен следующий подход. Выбирается ряд усредненных разностей фаз метеорных отражений за такой период времени (временное окно), при котором значение задержки сигнала в приемном тракте радара изменится незначительно (в данном случае 4 ч). С помощью генетического алгоритма производится подбор оптимальных значений калибровочных поправок для баз $da1$, $da2$, $db1$, $db2$ таким образом, чтобы было достигнуто минимальное значение целевой функции. Ключевым фактором, влияющим на результаты расчета, является различие приведенных к одному масштабу средних разностей фаз сигналов при отражении от индивидуальных метеорных следов, полученных на базах ($da1$, $da2$) и ($db1$, $db2$), а также соответствующих значений угловых координат. В данном случае за период с 20:00 12 декабря 2005 г. по 08:00 13 декабря 2005 г. абсолютное среднее значение различий разностей фаз в масштабе второй пары баз (3λ) варьировалось в пределах $1^\circ \div 3^\circ$ при величине стандартного отклонения $7^\circ \div 10^\circ$. В результате

Табл. 1

Пункты наблюдений	Харьков 1959 г.	Обнинск 1967 г.	Казань 1988, 1989 гг.	Казань 2005 г.
$\alpha, ^\circ$	111.0 ± 5	111.4	111.4, 111.6	112.2
$\delta, ^\circ$	32.2 ± 2	32.5	33.2, 33.2	33.4

мы получаем ряд угловых координат метеорных следов. В качестве итоговых значений координат используются значения, полученные по базам (*da3*, *db3*). Далее происходит сдвиг временного окна на заданное значение (в данном случае на 1 час) и повторный расчет угловых координат метеорных следов. После завершения расчетов рядов угловых координат метеорных следов, производится их последующая обработка для всех индивидуальных метеорных отражений, попавших более чем в одну итерацию обработки, то есть происходит их усреднение. Вычисленные после усреднения значения координат метеорных радиоэха используются для расчета координат потока. Результаты расчетов, выполненные в Казани в 1988, 1989, 1995 гг., а также результаты, полученные в Харькове в 1959 г. и в Обнинске в 1967 г., представлены в табл. 1. и свидетельствуют об удовлетворительном согласии значения радианта потока Геминид, рассчитанных в Харькове, Обнинске и Казани различными методами. Установленное удовлетворительное согласие значения радианта потока Геминид подтверждает правомерность статистического метода калибровки при выполнении фазовых угломерных измерений для расчета угловых координат индивидуальных метеорных радиоэхо. По результатам наблюдений потока Геминид в 2005 г. были определены его экваториальные геоцентрические координаты в максимуме активности: $\alpha = 112.2^\circ$, $\delta = 33.4^\circ$, $\lambda = 261^\circ$ (эпоха 1950.0).

В табл. 1 приведены значения координат радианта потока Геминид в период максимальной активности, полученные по измерениям на радиолокационных станциях низкой [7] и средней чувствительности [8, 9].

Экспериментальные значения положения радиантов для 2005 года в максимуме активности потока несколько отличаются от полученных ранее при наблюдениях потока Геминид в Харькове и Обнинске (табл. 1). Из табл. 1 и построенного на его основе графика на рис. 9 (точки на графике для 1937 года соответствуют значениям координат радианта, полученным Уиплом по фотографическим наблюдениям [11]) видно, что год от года наблюдается систематическое смещение положений радианта Геминид. Возможно, это явление можно объяснить вековыми изменениями орбиты Геминид, вызванными гравитационным воздействием планет [12], а также тем, что после 2000 года наблюдения проводились при пониженной мощности передатчика, вследствие чего в обработку вошли метеорные частицы больших масс.

По результатам экспериментального определения радианта потока Геминид для 1985–1986 гг. и 2005 г., выполненных корреляционным методом [5] (рис. 7), было установлено, что ошибки измерения прямого восхождения и склонения радианта не превышают соответственно $\Delta\alpha = 0.6^\circ$, $\Delta\delta = 0.3^\circ$. Учитывая, что склонение радианта потока Геминид $\delta = 32^\circ$, можно принять в качестве среднего ошибку измерения координат радианта 0.4° . Это значение соизмеримо с естественным разбросом радианта Геминид $+21'$, приводимого Уиплом по результатам фотографических наблюдений [11]. Полученные нами в 2005 г. координаты радианта Геминид не показывают заметного уширения области радиации по сравнению с результатами наблюдений, приведенных Уиплом в 1937 г. Другими словами, разброс измеренных в 2005 г. значений координат радианта находится в пределах их естественного разброса. Из этого следует, что нами реализована точность фазовых измерений горизонтальных координат зеркальных точек метеорных следов, которая позволила

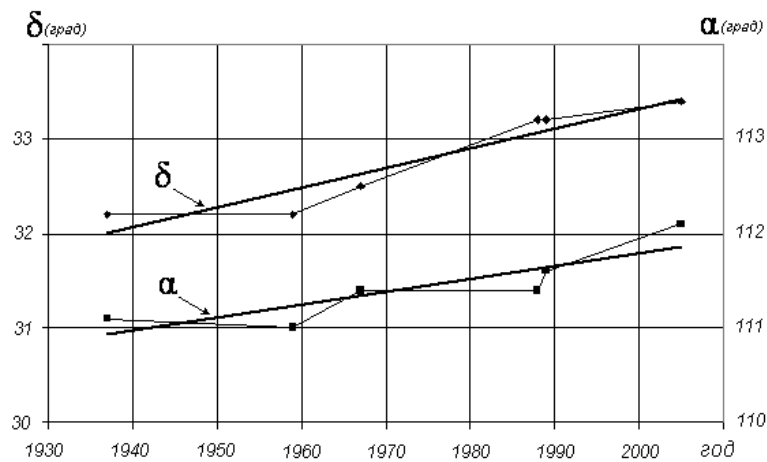


Рис. 9. Систематическое смещение положений радианта Геминид

рассчитать экваториальные координаты радианта Геминид с точностью, достижимой при фотографических наблюдениях. Полученные результаты подтверждают правомерность применения статистического метода калибровки при выполнении фазовых угломерных измерений. Рассчитанные значения координат потока Геминид 2005 года, лежащие в пределах их естественного разброса, могут свидетельствовать о достижении необходимой точности измерения горизонтальных координат зеркальных точек метеорных следов.

Заключение

Проведены радиометеорные измерения в период метеорного потока Геминид в 2005 г., выполнен расчет угловых координат индивидуальных метеорных радиоэха с применением разработанного статистического метода калибровки фазовых измерений, а также рассчитаны координаты метеорного потока Геминид. Выполнены оценки точности измерения угловых координат зеркальных точек на метеорных следах, которые оказались равными 0.4° . Рассчитаны значения координат потока Геминид: $\alpha = 112, 20^\circ$ $\lambda = 33, 40^\circ$. Полученные точности угловых координат зеркальных точек на метеорных следах и рассчитанные значения координат потока Геминид, лежащие в пределах их естественного разброса, в свою очередь, свидетельствуют о правомерности применения статистического метода калибровки при выполнении фазовых угломерных измерений. Проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что достигнутые точности измерений угловых координат зеркальных точек на метеорных следах в пределах 0.4° соответствуют точности измерений высот около 1 км.

Summary

A.M. Stepanov, A.N. Fakhrutdinova, D.V. Mamedov, K.A. Magdeev. Phase Goniometer Calibration at Observation of Meteor Tracks.

Possibility of calibration of the phase goniometric device of a meteoric radar upon results of supervision on meteoric streams is considered. The example of registration of a meteoric stream of Geminids is presented along with the definition of equatorial coordinates of its radiant. It is shown that regular meteoric streams, such as Geminids, may be used for calibration of a phase goniometer of a meteoric radar.

Key words: meteor track, atmosphere, wind velocity, electromagnetic wave, phase goniometer calibration.

Литература

1. *Фахрутдинова А.Н.* Циркуляция мезосферы – нижней термосферы средних широт. – Казань: Казан. гос. ун-т, 2004. – 167 с.
2. *Покровский Г.Б., Сидоров В.В., Михайлов Б.К., Фахрутдинов Р.Ю., Фахрутдинова А.Н.* Определение координат отражающих точек на метеорной станции КГУ-М4 // Метеорное распространение радиоволн. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1969. – Вып. 6. – С. 238–245.
3. *Корюкина Л.К., Сидоров В.В., Фахрутдинова А.Н.* Использование угломера метеорной станции для определения координат радиантов метеорных потоков // Метеорное распространение радиоволн. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1969. – Вып. 5–6. – С. 5–10.
4. *Jones J., Morton J.D.* The determination of meteor stream radiants from single station observations // Bull. Astron. Inst. Czech. – 1977. – V. 28, No 5. – P. 267–272.
5. *Степанов А.М.* Обнаружение метеорных потоков корреляционным методом // Астрон. вестн. – 1994. – Т. 28, № 1. – С. 76–80.
6. *Ловелл Б.* Метеорная астрономия. – М.: Физматгиз, 1958. – 488 с.
7. *Горелик С.Л., Михелевич Е.Г., Пинцов В.А.* Обработка изображений при помощи неточечных преобразований // Автоматика и телемеханика. – 1979. – № 2. – С. 100–109.
8. *Дуда Р., Харт П.* Распознавание образов и анализ сцен. – М.: Мир, 1976. – 512 с.
9. *Кащеев Б.Л., Лебединец В.Н.* Радиолокационные исследования метеорных явлений // Результаты исследования по МГГ. – М.: АН СССР, 1961. – № 7. – 124 с.
10. *Мамедов Д.В.* Разработка унифицированной программы обработки амплитудно-временных и фазовременных измерений метеорного радара КГУ // Актуальные проблемы естественных и гуманитарных наук: Сб. материалов конф. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2006. – С. 31–33.
11. *Whipple F.L.* Photographic meteor studies. I // Proc. Amer. Phil. Soc. – 1938. – V. 79. – P. 499–548.
12. *Бабаджанов П.Б., Обрубов Ю.В.* Особенности эволюции метеорных роев Геминид и Квадрантид // Астрон. журн. – 1984. – Т. 61, № 5. – С. 1005–1012.

Поступила в редакцию
07.05.09

Степанов Анатолий Михайлович – научный сотрудник лаборатории ПРАЛ кафедры радиофизики Казанского государственного университета.

E-mail: *ammistep@mail.ru*

Фахрутдинова Антонина Николаевна – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории ПРАЛ кафедры радиофизики Казанского государственного университета.

E-mail: *Antonina.Fahrutdinova@ksu.ru*

Мамедов Денис Владимирович – аспирант кафедры радиофизики Казанского государственного университета.

E-mail: *andenixd@mail.ru*

Магдеев Константин Альбертович – аспирант кафедры радиофизики Казанского государственного университета.

E-mail: *mrmmrmmrmm@mail.ru*