

ПОГРЕШНОСТИ ФАЗОВОГО ВЫСОТОМЕРА

В. В. Жуков

Погрешности высотомера определялись двумя способами [1]; расчетным путем определялись погрешности отдельных каскадов аппаратуры и находилась суммарная погрешность;

в рабочих условиях с помощью высоколетающего самолета и стандартной станции сопровождения проводилась калибровка всего устройства.

Инструментальные погрешности фазового высотомера, установленные аналитическим путем, следующие [1].

1. Погрешность отсчета фазовых сдвигов по фоторегистрациям.

При обработке экспериментальных данных (более 500 метеоров) было установлено, что при диаметре кольцевых разверток порядка 12 см на аппарате «Микрофот» с объективом ю-12 случайная погрешность отсчета фазовых сдвигов не более 3° .

2. Аппаратурная ошибка в результате уменьшения скорости движения электронов в трубках при формировании «электрического нуля».

Нулевая метка на окружности большего диаметра при понижении напряжения на третьем аноде трубок 13Л037А от 2,85 до 1,5 кВ появится несколько позже по сравнению с исходным случаем $U_{аз} = 2,85$ кВ. Запаздывание по времени нулевой метки приводит к появлению постоянной фазовой ошибки $+0,64^\circ$, которую можно учесть.

3. Погрешность, вызванная влиянием шумов.

При наличии шумов (атмосферных, космических, внутренних) на выходе фазометра возникают флуктуации отсчета фазы $\psi(t)$ вокруг истинного отсчета ψ_0 . Среднеквадратическое отклонение мгновенной фазовой ошибки $\Delta\Phi = \psi(t) - \psi_0$ характеризует ошибку отсчета фазы в присутствии шумов. Если сигналы в обоих каналах значительно сильнее шумов ($q > 3$), то мгновенная фазовая ошибка $\Delta\Phi$ распределена нормально со средним — нуль и среднеквадратичным отклонением $\sigma_{\Delta\Phi} = \frac{1}{\sqrt{q}}$,

где $q = \frac{U_{с.эф}^2}{\sigma_{ш}^2}$ — отношение мощности сигнала к мощности помехи в каналах высотомера. При этом предполагается, что каналы идентичны, шумы гауссовы и не коррелированы между каналами [2, 3].

Фоторегистратор фазового высотомера запускается сигналом, который в десять и более раз превышает шум по напряжению. При этом среднеквадратичное отклонение мгновенной фазовой ошибки

$$\sigma_{\Delta\Phi} = \frac{57,3}{\sqrt{100}} = 5,7.$$

За время регистрации одного метеора (0,1 сек) фазовый отсчет усредняется примерно 360 раз [1], а при умножении сигнала в одном из каналов — в шесть раз, среднеквадратичная погрешность фазовых углов относительно «электрического нуля», вызываемая шумами:

$$\sigma_3 = \sqrt{37} \frac{\sigma_{\Delta\Phi}}{\sqrt{360}} = 1,8^\circ.$$

4. Погрешность отсчета в результате непостоянства угловой скорости круговой развертки.

Изменение угловой скорости движения луча при круговой развертке обуславливается погрешностью фазорасщепителя, напряжения на выходе которого сдвинуты неточно на 90° , неравенством отклонений по горизонтальной и вертикальной осям и наличием гармоник в напряжении развертки. Все перечисленные причины можно устранить, сделав регулировку амплитуд сигналов на пластинах и установив регулируемый фазовращатель. Для подавления гармоник в сигнале развертки после УПЧ-ограничителя поставлен двухконтурный полосовой фильтр. Одна из фазосдвигающих цепей сделана регулируемой. Однако добиться «идеальных» окружностей на всех четырех трубках невозможно из-за допусков по чувствительности и перпендикулярности пластин X и Y трубок. Для получения «идеальных» окружностей следовало бы сделать для каждой трубки свою развертку.

Экспериментально можно добиться отклонения реальных окружностей от идеальной на 5—10% для всех трубок, что дает ошибку в определении сдвига фаз $\sigma_4 = 1,5—3^\circ$.

5. Аппаратурная погрешность из-за неидентичности входных цепей высотомера.

Входные цепи представляют параллельные контуры, зашунтированные сопротивлениями порядка 10^3 Ом. Фазовая ошибка, вносимая входными цепями, получается в основном в результате неточной настройки

входных контуров. Для конкретной схемы она не превышает 1° при расстройке на ± 100 кГц относительно резонансной частоты.

6. Аппаратурная ошибка, получаемая из-за связи каналов фазометра.

В изготовленной аппаратуре для устранения связей между каналами были применены буферные усилители в канале гетеродинного напряжения, тщательная экранировка первых каскадов УВЧ обоих каналов, развязка цепей питания и запитка приемников от отдельных выпрямителей. Экспериментальная проверка ослабления сигнала одного канала в другом показала, что она составляет не менее 54 дБ, поэтому ошибку сдвига фаз из-за связи каналов можно не учитывать, так как она равна $0,2^\circ$.

7. Динамическая погрешность разности фаз, обусловленная нестационарными процессами в приемных каналах высотомера.

Динамическая погрешность определяется величиной вариации фазы высокочастотного заполнения радиоимпульсов на выходах приемников фазового высотомера [4]. Эта погрешность систематическая, поэтому в случае применения «электрического нуля» она почти полностью устраняется и в дальнейшем не учитывается.

На результат измерения разности фаз влияют также фазовые нестабильности умножителя частоты, формирующего отсчетные метки, усилителей-ограничителей и избирательных усилителей УВЧ и УПЧ обоих каналов. Эти нестабильности вызваны дробовыми, тепловыми и фликер-шумами ламп, что, в свою очередь, приводит к флуктуациям внутреннего сопротивления R_i , напряжения отсечки $E_{с.о}$ и междуэлектродных емкостей, а также неконтролируемыми изменениями параметров деталей (температурные и амплитудно-фазовые влияния, эффект мерцания емкости керамических конденсаторов и т. д.). Величины этих нестабильностей строго оценить трудно, поэтому приводятся приближенные оценки для выяснения порядка этих погрешностей.

а) Влияние фазовых нестабильностей умножительного каскада можно принять [5]

$$\sigma'_{ум} = Q \frac{57,3 \cdot 10^{-4} \cdot C_x}{C_k} = 0,04^\circ,$$

где Q — добротность контура умножителя 90;

C_k — емкость контура 100, пф;

C_x — холодная входная емкость следующей за умножителем лампы,

$$C_x \approx 0,5C_{вх} = 8 \text{ пф}.$$

Учитывая усреднение на трубках 360 периодов и измерение относительно «электрического нуля», получим окончательно:

$$\sigma_{ум} = \frac{0,04 \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{360}} = 0,003^\circ.$$

б) Фазовая нестабильность УВЧ (по два каскада в каждом канале)

$$\sigma_{УВЧ} = \frac{2\sqrt{37} \cdot Q \cdot 57,3 \cdot 10^{-4} \cdot C_x}{C_k \sqrt{360}} = 0,009^\circ,$$

где

$$C_x = 7 \text{ пф};$$

$$C_k = 240 \text{ пф};$$

$$Q = 90.$$

в) Фазовая нестабильность УПЧ (4 каскада в каждом канале) и УПЧ-ограничителей. Для снижения динамического диапазона ограничения

перед УПЧ-ограничителями поставлены диодные ограничители

$$\sigma_{\text{УПЧ}} = \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{5} \cdot \sqrt{37} \cdot Q \cdot 57,3 \cdot 10^{-4} C_x}{C_k \sqrt{360}} = 0,002^\circ,$$

где

$$\begin{aligned} C_x &= 7 \text{ нФ}; \\ C_k &= 300 \text{ нФ}; \\ Q &= 16. \end{aligned}$$

В дальнейшем фазовыми погрешностями УВЧ, -УПЧ, -УПЧ-ограничителей и множителя частоты пренебрегаем в силу их малости.

Считая действия всех частных погрешностей независимыми, была найдена случайная среднеквадратичная погрешность фазового угламера

$$\sigma_\varphi = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2 + \sigma_5^2} = 4,7^\circ.$$

Экспериментальным путем величина этой ошибки σ'_φ была оценена по большому числу зарегистрированных метеоров в предположении, что измерения по двум антенным базам высотомера равноточные и независимые.

Отношение измеренных углов $\frac{\Delta\varphi_{4,5}}{\Delta\varphi_{2,5}} = a$ для данного расположения антенн [1] постоянно, но так как углы $\Delta\varphi_{4,5}$ и $\Delta\varphi_{2,5}$ измеряются с погрешностями $\sigma_{\Delta\varphi_{4,5}} = \sigma_{\Delta\varphi_{2,5}} = \sigma'_\varphi$, то и отношение a флуктуирует со среднеквадратичным отклонением σ_a . Разбив все зарегистрированные метеоры на интервалы, в которых математические ожидания $M(\Delta\varphi_{2,5})$ и $M(\Delta\varphi_{4,5})$ можно принять постоянными, определяем

$$\sigma_a = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_i - Ma)^2}{n-1}} = \frac{\sigma'_\varphi \sqrt{1 + M^2 a}}{\sqrt{(\sigma'_\varphi)^2 + M^2 (\Delta\varphi_{2,5})^2}},$$

а затем σ'_φ .

Вместе с тем разность направляющих косинусов, определенных по двум базам для метеоров, должна быть равна нулю [6].

$$\cos' \alpha - \cos'' \alpha = \frac{\Delta\varphi_{4,5}}{2\pi d_2/\lambda} - \frac{\Delta\varphi_{2,5}}{2\pi d_1/\lambda} = \frac{1}{2\pi d_2/\lambda} (\Delta\varphi_{4,5} - a\Delta\varphi_{2,5}) = \frac{\Lambda}{2\pi d_2/\lambda}.$$

Из-за погрешностей $\Delta\varphi_{4,5}$ и $\Delta\varphi_{2,5}$ эта разность флуктуирует. Опреде-

лив по метеорам $\sigma_\Lambda = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Lambda_i - M\Lambda)^2}{n-1}} = \sigma'_\varphi \sqrt{1 + a^2}$, можно определить σ'_φ .

В рабочей области высотомера $\sigma'_\varphi \leq 4,5^\circ$.

Если считать, что погрешностями определения λ , d_1 , d_2 в выражении (1) [1] можно пренебречь, то средняя квадратичная погрешность высоты отражающей точки метеорного следа определится так:

$$\sigma_h = \sqrt{\sigma_R \left(\sin \varepsilon + \frac{R}{R_3} \cos^2 \varepsilon \right)^2 + \left(\frac{R}{\text{tg} \varepsilon} + \frac{R^2 \cos \varepsilon}{R_3} \right)^2 \left(\frac{\sin^2 \theta}{d_1^2} + \frac{\cos^2 \theta}{d_2^2} \right)^2 \frac{\sigma_\varphi^2 \lambda^2}{4\pi^2}},$$

где R — наклонная дальность до отражающей точки;

R_3 — радиус Земли;

ε — угол места;

θ — азимут;

d_1 , d_2 — антенные базы;

λ — длина волны;

σ_h , σ_R , σ_φ — среднеквадратичные погрешности.

При среднеквадратичной погрешности наклонной дальности 1 км для рабочей области высотомера $\varepsilon \geq 35^\circ$, $\theta \pm 15^\circ$ среднеквадратичная погрешность высоты равна 1 км.

Калибровка высотомера проводилась с помощью высоколетящего самолета, который облучался передатчиком метеорной РЛС, а отраженный сигнал регистрировался фазовым высотомером. Одновременно координаты самолета определялись стандартной РЛС сопровождения с погрешностями $\sigma_R = 20$ м; $\sigma_{\varepsilon, \theta} = 0,1^\circ$.

При обработке результатов облета учитывались погрешности высотомера, вызванные разносом на 185 м станции сопровождения и центральной антенны высотомера $\Delta R = \pm 40$ м; $\Delta \theta = \pm 0 - 2^\circ$; $\Delta \varepsilon = \pm 0,2^\circ$.

Так же учитывались погрешности высотомера, возникающие в результате сферичности волны, отраженной от самолета; при высоте полета 12 км для угломестных баз они равны 1—3,5°, для азимутальных 0,8—2,3°.

Обработка результатов облета показала, что существует систематическая ошибка отсчета фаз по угломестным базам (около 20°). Погрешность эта обусловлена подъемом площадки, на которой расположены антенны, в восточном направлении приблизительно на 1°, так как при обработке данных высотомера этот подъем не учитывался.

Существует систематическая ошибка в определении наклонной дальности высотомером (2 км) из-за задержек сигнала в приемнике и формирующих каскадах. Наблюдается более значительное отклонение координат, определяемых с помощью фазового высотомера, от координат станции сопровождения при углах места, меньших 30°. Эти расхождения можно объяснить влиянием местных предметов для малых углов прихода радиоволн.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Жуков, Б. С. Дудник. Радиолокационная аппаратура для измерения высот метеоров. См. статью в настоящем сборнике.
2. В. В. Цветнов. Статистические свойства сигналов и помех в двухканальных фазовых системах. «Радиотехника», 1957, № 5.
3. В. В. Цветнов. Воздействие Гауссовых помех на двухканальные фазовые системы. Сборник трудов МАИ «Исследование точности и помехоустойчивости фазовых радиопеленгаторов». Судпромгиз, 1959.
4. И. Д. Золотарев. Нестационарные процессы в резонансных усилителях фазо-импульсных измерительных систем. Изд-во «Наука», Новосибирск, 1969.
5. М. Е. Жаботинский, Ю. Л. Свердлов. Основы теории и техники умножения частоты. Изд-во «Советское радио», 1964.
6. В. М. Колмаков. Измерение угловых координат метеорных следов фазовым методом. Бюлл. ин-та астрофизики Академии наук Таджикской ССР, № 49, 1968.

ОПТИМАЛЬНЫЕ РЕГИСТРАТОРЫ МЕТЕОРНЫХ РЛС

В. А. Нечитайленко

Радиометод стал одним из основных, а при статистических исследованиях решающим методом изучения метеорных явлений. Развитие метеорной радиоэлектроники [1] позволило не только получить исключительно большой статистический материал, но и породило свою специфическую проблематику как в исследовании метеоров, так и в конструировании соответствующей радиоэлектронной аппаратуры.

Одной из важнейших задач метеорной радиоэлектроники является создание эффективных регистраторов метеорных РЛС с высокой помехоустойчивостью, оперативностью и разрешающей способностью, автомати-