

*Ю.И. ВОЛОЩУК, д-р техн. наук,
И.А. МИЛЮТЧЕНКО, канд. техн. наук*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОМЕТЕОРНОЙ СИСТЕМЫ СЛИЧЕНИЯ ШКАЛ ВРЕМЕНИ

Постановка задачи

Как известно, метеорные явления создают для радиоволн дополнительный (наряду с тропосферным, ионосферным и др.) канал связи на УКВ. Благодаря стабильности и обратимости задержки сигналов за время существования метеорного следа, метеорное распространение радиоволн (МРРВ) используется, в частности, при сличении шкал разнесенных эталонов времени.

Основной задачей, выполняемой радиометеорной аппаратурой, которая применяется для сличения шкал эталонов времени (РМС), находящихся в различных пунктах, является определение временного положения сигналов. Вопрос повышения точности фиксации сигнала на шкале времени, методика оценки погрешностей детально анализируются в литературе [1-3]. К основным видам погрешностей в РМС относятся: погрешности, обусловленные конечным соотношением сигнал-помеха; аппаратурные погрешности, вызванные нестабильностью задержек в трактах приема и передачи; погрешности, обусловленные алгоритмами обмена информацией о временных импульсах между пунктами размещения эталонов времени. Помимо указанных инструментальных возникают погрешности, обусловленные невзаимностью времени задержки сигналов при МРРВ, нестабильностью сигналов эталонов и др. Те погрешности, которые не являются систематическими, могут быть уменьшены за счет увеличения статистической обеспеченности.

Существуют различные способы сличения шкал разнесенных эталонов времени, но в любом случае аппаратура, используемая в РМС, должна иметь минимальные инструментальные погрешности. Для оценки аппаратурной систематической погрешности, вызванной неравенством разностей времени задержки сигнала в трактах приема и передачи для различных комплектов аппаратуры, может быть использован радиолокационный калибровочный режим работы двух комплектов аппаратуры, или режим нулевой базы.

Для повышения эффективности калибровочного режима необходимо определить азимут направления максимального излучения антенны, при котором наблюдается наибольшая численность метеорных отражений для заданных характеристик аппаратуры в зависимости от

времени суток и даты калибровки. При этом, кроме обеспечения режима максимальной численности, должно выполняться дополнительное условие: $t_p > t_{p \text{ мин}}$. Время распространения t_p должно быть больше некоторого минимального значения $t_{p \text{ мин}}$, которое обусловлено техническими характеристиками аппаратуры, в том числе длительностью кодовой посылки. Время $t_{p \text{ мин}}$ определяет диапазон дальностей метеорных отражений, а при известной высоте метеорной зоны — угол места оси диаграммы направленности антенны ε_m и, соответственно, высоту подъема антенны h_a .

Таким образом, сформулируем задачу оптимизации параметров режима калибровки РМС: установить высоту подъема антенны h_a и азимут направления максимального излучения A_m , при которых наблюдается наибольшая численность метеорных отражений N_k , в зависимости от момента калибровки при ограничениях, обусловленных техническими характеристиками аппаратуры. Запишем задачу в общем виде:

$$N_k(h_a, A_m(t)) \rightarrow \max \quad (1)$$

при ограничениях

$$t_p - t_{p \text{ мин}} \geq 0; \quad t_1 < t < t_2; \quad t = \overline{0, 23}$$

где $t_2 - t_1$ — интервал времени, сут, заданный для калибровки.

Для решения задачи (1) воспользуемся методом математического моделирования. По усредненным результатам измерений на системе МАРС [4] была построена модель пространственного распределения метеорных тел [5], которая в первом приближении отражает характерные особенности метеорного комплекса вблизи орбиты Земли. Примем эту модель в качестве исходной модели P_M , но исправим распределение плотности радиантов по гелиоцентрической небесной сфере на структурную избирательность в соответствии с результатами, полученными в [6].

Для решения задачи (1) в качестве составных частей модели режима калибровки РМС используем модель пространственной плотности метеорных тел P_M и модель оператора Φ прямой задачи радиолокации метеоров, полученную в [7].

Модель режима калибровки РМС

Исходные данные:

- дата и временной интервал калибровки $t_2 - t_1$;
- географические координаты пункта калибровки;
- распределения плотности радиантов (изменяются в зависимости от месяца) — массив p_l ;
- распределение гелиоцентрических скоростей (среднегодовые) метеорных тел — массив v_{lq} ;
- координаты центров площадок небесной сферы — массив $(\beta_l', \lambda_l' - \lambda_a)$, $l = \overline{1, 1600}$ согласно [8];

Параметры аппаратуры:

- 1) рабочая длина волны λ ;
- 2) мощность передающего устройства P ;
- 3) чувствительность на входе приемника E ;
- 4) порог по длительности регистраций T ;
- 5) минимальное время распространения $t_{p\text{ мин}}$;
- 6) тип антенны — 5-элементный “волновой канал” (ВК);
- 7) коэффициент усиления антенны G .

Главный лепесток диаграммы направленности (ДН) антенны аппроксимируется в виде

$$f(\theta, \varepsilon) = G g_\Gamma(\theta) g_B(\varepsilon), \quad (2)$$

где $g_\Gamma(\theta)$, $g_B(\varepsilon)$ — нормированные функции направленности для горизонтальной и вертикальной плоскостей.

Для 5-элементного “волнового канала” используются полученные экспериментальным путем соотношения [9]

$$g_\Gamma(\theta) = \cos^{n_1}(\theta); \quad g_B(\varepsilon) = c[\cos^{n_2}(\varepsilon) \sin(\frac{2\pi}{\lambda} h_a \sin(\varepsilon))]^{n_3}, \quad (3)$$

где θ, ε — азимут и угол места направления на отражающую точку; $n_1 = 4,5$; $n_2 = 1,6$; $n_3 = 3,5$ — аппроксимирующие коэффициенты; c — нормирующий множитель, определяемый соотношением h_a/λ .

Минимальное время распространения $t_{p\text{ мин}}$ определяет минимальную дальность до метеорного следа $R_{\text{мин}}$. Согласно [10] зона радионаблюдения метеоров охватывает диапазон высот от 80 до 105 км. Принимая минимальную высоту метеорной зоны $h_{\text{мин}} = 80$ км,

устанавливаем угол места оси ДН ε_m и ширину ДН в вертикальной плоскости $2\varepsilon_v$ по уровню 0,5. Пользуясь соотношением (3), находим высоту подъема антенны h_a при заданном значении λ . Например, при $t_{p, \min} = 2,5$ мс и $\lambda = 6,5934$ м получаем $R_{\min} = 375$ км; $\varepsilon_m + \varepsilon_v < 12^\circ$; $h_a/\lambda > 1,7$; $h_a > 11,2$ м.

Ширина диаграммы направленности, угол места ε_m и азимут направления максимального излучения A_m , граничные высоты метеорной зоны определяют допустимую область S_g , в которой могут находиться "зеркальные" отражающие точки на метеорном следе. Предполагается, что из каждой l -й площадки на небесной сфере генерируется некоторое число метеоров N_1 , пропорциональное заданной плотности p_l , но из этого числа полезными будут $N_2 = N_1 k_s$, где k_s — коэффициент, учитывающий площадь собирающей поверхности метеорной РЛС. Далее определяются азимут A_p и зенитный угол Z радианта. Если $Z > 0$ и выполняются геометрические условия отражения, генерируются случайные координаты отражающей точки ε_0 , θ_0 , h_0 в пределах допустимой области. Затем генерируются случайные плотность δ и масса метеорного тела M в соответствии со степенным законом распределения.

Далее, согласно принятой модели оператора Φ , последовательно вычисляются высота максимума ионизации h_m , относительная длина следа Δl , эффективная электронная плотность $\alpha_{эф}$ с учетом влияния начального радиуса и диффузии и амплитуда сигнала U_m на входе приемника для заданных параметров аппаратуры. Если амплитуда отраженного сигнала от данного следа превышает амплитудный порог E , то с учетом влияния прилипания и диффузии вычисляется длительность сигнала τ . Если длительность выше порогового значения T , метеор считается зарегистрированным и выполняется накопление необходимых статистических данных. Кроме общей численности регистраций N_k , накапливаются распределения высот, скоростей, дальностей зарегистрированных метеоров, а также распределения амплитуд и дальностей отраженных сигналов. Если амплитуда или длительность сигнала оказалась ниже пороговой, генерируется следующий метеор с той же скоростью v_h , пока количество метеоров

не превысит N_2 , затем происходит переход к следующему значению v_h , и т. д.

Данный алгоритм позволяет рассчитать численность регистраций для аппаратуры РМС в радиолокационном режиме при заданных значениях параметров A_m и h_a в зависимости от времени калибровки. Схема алгоритма моделирования режима калибровки показана на рис. 1.

Результаты проверки и исследования модели

Диагностическая проверка модели радиолокационного режима РМС проведена в два этапа, по результатам измерений на комплексе МАРС в Харькове, приведенным в [5; 11]. Вначале в модели были заданы угол места $\varepsilon_m = 45^\circ$ и азимут максимального излучения $A_m = 270^\circ$, а также ширина диаграммы направленности ($270^\circ \pm 2,5^\circ$; $45^\circ \pm 15^\circ$), соответствующие ДН МАРС. При этом по результатам расчета областей видимости радиантов для модели РМС установлено совпадение с соответствующими по дате и времени суток областями для МАРС [11]. На втором этапе был рассчитан суточный ход численности метеорных отражений в радиолокационном режиме для типовой аппаратуры РМС с такими параметрами:

- 1) частота $f = 45,5$ МГц ($\lambda = 6,593$ м);
- 2) мощность передающего устройства $P = 50$ кВт;
- 3) пороги по амплитуде и длительности $E = 1$ мкВ, $T = 1,9$ мс;
- 4) высота подъема антенны $h_a = 11,2$ м;
- 5) тип антенны: 5-элементный ВК;
- 6) место установки аппаратуры: г. Харьков.

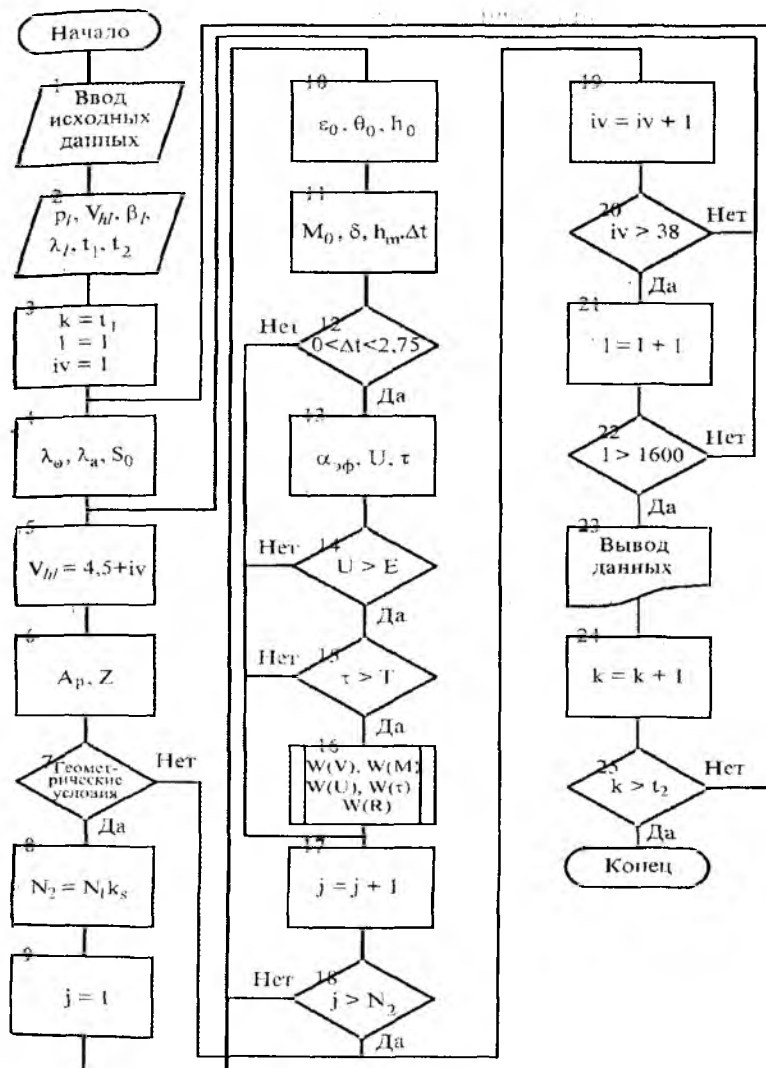


Рис. 1

На рис. 2 показан суточный ход численности регистраций в январе для системы МАРС по данным [5] для второго амплитудного уровня (кривая 2 - 1977 г., 3 - 1975 г.) и для модели РМС (кривая 1).

Наблюдается удовлетворительное совпадение формы кривых. Следует отметить, что сравнивались именно формы кривых, так как абсолютные значения N_k могут различаться из-за того, что МАРС и РМС регистрируют метеоры в различном диапазоне масс. Правомерность такого сравнения подтверждается результатами работы [12], где показано, что кривые суточного хода численности метеоров на разных амплитудных уровнях подобны, что является следствием обратного степенного закона распределения метеорных радиосигналов по амплитуде и метеорных тел по массе.

После проверки работоспособности модели рассмотрим решение задачи (1). Предварительно проанализируем ограничения. На основании суточного хода численности (см. рис. 2) выберем время калибровки, соответствующее максимальной численности регистрации, — от 0 до 12 ч. Выше было показано, что значение $t_{p\text{мин}}$ с учетом аппроксимации (3) определяет минимальную высоту подъема антенны $h_{a\text{мин}}$. Поскольку увеличение высоты подъема антенны выше $h_{a\text{мин}}$ не влияет

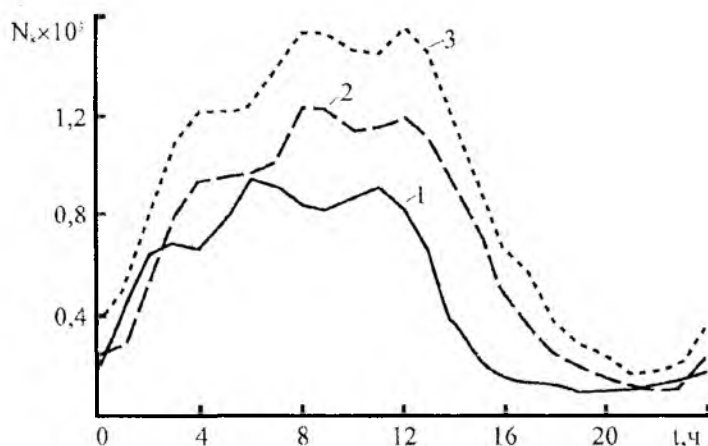


Рис. 2

существенно на результат и, кроме того, связано с конструктивными сложностями, зададим $h_a = \text{const} = h_{a_{\text{мин}}}$. Таким образом, задача (1) преобразуется в вид: при $6 < t < 12$ ч.

$$N_k(A_m(t)) \rightarrow \max \quad (4)$$

Априорно известно, что функция N_k зависит от A_m неявно. В таком случае для определения экстремума применяют поисковые методы, основанные на последовательном вычислении анализируемой функции. Для выбора метода решения задачи (4) установим вид функции $N_k(A_m)$. На рис. 3 — 4 показаны рассчитанные согласно алгоритму (см. рис. 1) зависимости численности регистраций от азимута (астрономического, отсчитываемого от юга к западу) направления максимального излучения для нескольких часов в январе (рис. 3) и октябре (рис. 4).

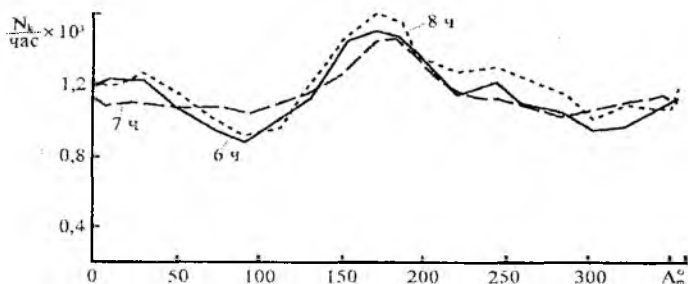


Рис. 3

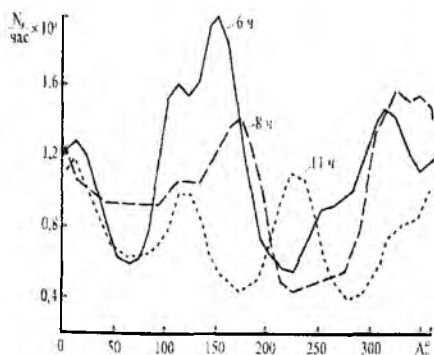


Рис. 4

Анализ зависимостей показывает, что функция $N_k(A_m)$ является непрерывной, многомодальной, однако число экстремумов невелико. Например, для октября явно выражены два максимума N_k — соответствующие значению азимута $A_m = 100$ — 160° и $A_m = 300$ — 360° ; для января наиболее благоприятным является се-

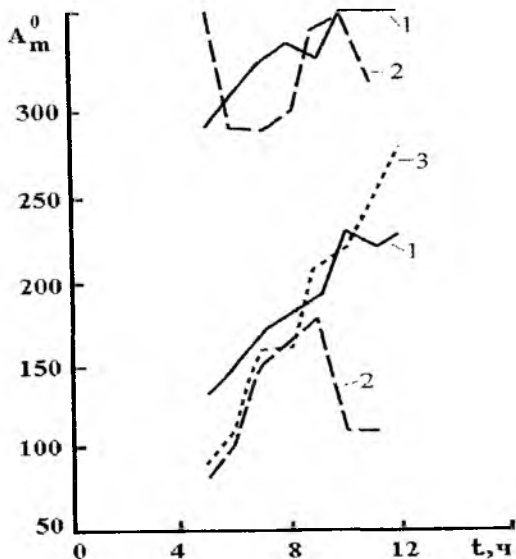


Рис. 5

верное направление, $A_m = 180^\circ$.

На основании проведенного предварительного анализа для решения задачи (4) воспользуемся наиболее простым методом нулевого порядка — методом сканирования с переменным шагом [13]. На рис. 5 показаны рассчитанные для модели зависимости «калибровочных» азимутов от времени суток для нескольких месяцев (кривая 1 — октябрь; 2 — август; — июнь).

Отметим, что возможно существование нескольких примерно равноценных значений (например, август, октябрь), и исследователь может выбрать наиболее подходящее с точки зрения организации эксперимента.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы:

1. Полученная в результате интерпретации радиометеорных данных в радиотехнической системе определения координат радиантов модель пространственной плотности метеорных тел P_M может быть использована для решения прикладных задач, в частности для определения характеристик радиометеорных систем сличения шкал времени.

2. Рассмотренная в статье имитационная модель режима калибровки РМС позволяет оптимизировать его основные параметры, т.е. в зависимости от интервала времени суток и даты калибровки определить такие направление максимального излучения и высоту подъема антенны, которые обеспечивают максимальное число регистраций.

3. Методику построения имитационной модели можно применить не только для оптимизации радиолокационного режима, но и

для получения прогноза численности РМС для различных трасс в режиме сличения.

Список литературы: 1. *Метеорная синхронизация шкал времени* / Под ред. Б.И. Макаренко. М.: М-во обороны СССР, 1989. 142 с. 2. *Новый комплекс аппаратуры для сличения эталонов времени и частоты по метеорному радиоканалу* / Б.С. Дудник, Б.Л.Кашеев, Ю.А.Коваль и др. // Измер. техника. 1986. № 4. С. 15 - 16. 3. *Дудник Б.С., Коваль Ю.А., Пушкин С.Б.* Критерии оценки точностных показателей радиометеорных комплексов для синхронизации шкал времени // Там же. № 1. С. 16 - 18. 4. *Метеорная автоматизированная радиолокационная система* / Б.Л. Кашеев, Ю.И. Волощук, А.А. Ткачук и др. // Метеор. исслед. 1977. № 4. С. 11- 61. 5. *Волощук Ю.И., Кашеев Б.Л.* Распределение метеорных тел вблизи орбиты Земли. М.: Наука, 1981. 87 с. 6. *Милютченко И.А.* Структурная избирательность радиолокационной системы измерения радиантов метеоров // Междунар. конф. "Метеорные частицы в атмосфере Земли": Тез. докл. X., 1996. С. 28. 7. *Волощук Ю.И., Милютченко И.А.* Решение прямой задачи радиолокации метеоров методом математического моделирования // Метеор. исслед. 1986. № 13. С. 84 - 92. 8. *Волощук Ю.И., Милютченко И.А.* О представлении распределения параметров потока метеорных тел по небесной сфере // Там же. № 12. С. 63 - 74. 9. *Олейников В.Н.* Начальный радиус метеорного следа и его влияние на замечаемость радиолокационных метеоров: Автореф. дис... канд. техн. наук. X., 1983. 28 с. 10. *Волощук Ю.И., Кашеев Б.Л., Кручиненко В.Г.* Метеоры и метеорное вещество. К.: Наук. думка, 1989. 296 с. 11. *Ткачук А.А., Маценко С.В.* Области видимости метеорных радиантов // Метеор. исслед. 1981. № 7. С. 63 - 73. 12. *Кашеев Б.Л., Ткачук А.А., Волощук Ю.И.* Численность слабых радиометеоров // Там же. 1978. № 5. С. 25 - 31. 13. *Евдокимов А.Г.* Минимизация функций и ее приложение к задачам автоматизированного управления инженерными сетями. X.: Выща шк. Изд-во при Харьк. ун-те, 1985. 288 с.

*Запорожский государственный
технический университет*

Поступила в редколлегию 10.04.97