

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНОЙ ИЗБИРАТЕЛЬНОСТИ МНОГОПОЗИЦИОННОЙ МЕТЕОРНОЙ РТС. 2. РАСЧЕТ СТРУКТУРНОГО ФАКТОРА

Методика оценки структурной избирательности [1] предполагает определение оптимальных базовых параметров метеорной РТС. Ограничим набор оптимизируемых параметров координатами вынесенных пунктов (ВП) и проведем оптимизацию для системы МАРС [2] Харьковского технического университета радиоэлектроники с известной диаграммой направленности (ДН) антенной системы центрального пункта (ЦП). Антенна ВП ограничена по размерам и, следовательно, ее диаграмма шире, чем в ЦП. Поэтому при установлении геометрических условий отражения пространственная область, удовлетворяющая этим условиям, в первом приближении определяется ДН ЦП.

Основное требование, предъявляемое к радиометеорной системе, — получение максимального количества информации о потоке метеорного вещества из различных участков небесной сферы. Поэтому критерием оптимальности расположения ВП (критерием минимума структурной избирательности) может быть максимум взвешенной (с учетом неравномерного распределения радиантов) площади S области небесной сферы, осматриваемой антенной системой в течение заданного времени (например, за сутки). При этом погрешности определения координат радианта метеора не должны превышать допустимых.

Поставленную задачу оптимизации в общем виде можно классифицировать как задачу минимизации (максимизации) вещественнозначной функции $S(X)$ (функции цели) N -мерного векторного аргумента $X = (x_1, x_2, \dots, x_N)$, компоненты которого удовлетворяют набору неравенств $g_j(x) \geq 0$, а также ограничены сверху и снизу, т.е. $x_i^{(u)} \geq x_i \geq x_i^{(l)}$. Здесь $g_j(x) \geq 0$ — записанные в форме неравенств функциональные соотношения между управляемыми переменными x_i , позволяющие сузить область их допустимых значений.

В качестве функции цели $S(X)$ может служить оценка общей взвешенной площади S области небесной сферы, осматриваемой радиолокационной системой, а компонентами векторного аргумента X

могут быть координаты ВП ($R_i, \varphi_i, i = 1, 2$) в полярной системе координат, в начале которой расположен ЦП. Необходимо найти такие оптимальные координаты, чтобы функция $S(X)$ была максимальна при следующих ограничениях:

1. Выполняются геометрические условия регистрации для трех пунктов.

2. Погрешности определения горизонтальных координат радианта $\sigma A_i, \sigma Z_i$ меньше заданных $\sigma A_0, \sigma Z_0$.

3. Если запуск на регистрацию осуществляется сигналом ЦП и от него отсчитываются временные задержки Δt , то $\Delta t_i < 0$ либо $0 < \Delta t_i < t_{\min}$. Здесь t_{\min} определяет временное положение первого минимума амплитудно-временной характеристики (АВХ) отраженно-го сигнала ЦП.

4. Временные задержки $|\Delta t_i| < T_p - t_{\min}$, где T_p — время фиксации АВХ. В случае использования фоторегистратора — это время развертки. При автоматизации предварительной и первичной обработок — это объем буферной памяти ЭВМ, в которую записываются цифровые коды амплитуд отраженных импульсов. Для МАРС $T_p = 0,2$ с.

5. Имеет место соотношение $|\varphi_i - \varphi_0| < \pi / 2$, где φ_0 — заданный азимут направления излучения (геодезический, отсчитывается от севера к востоку). Для МАРС $\varphi_0 = \pi / 2$.

6. Длина базы $0 < R_i \leq R_{\max}$, где R_{\max} определяется величиной T_p .

Рассмотрим подробнее первое ограничение. Геометрические условия регистрации метеоров для одной станции получены в [3]. При выполнении условия

$$\cos^2 \Psi_1 + \cos^2 \Psi_{20} \leq 1 \quad (1)$$

для вектора скорости метеора \bar{V}_A в системе координат, связанной с осью антенны, выполняется условие "зеркальности" отражения. В (1) Ψ_1 — угол между \bar{V}_A и осью Z_A ДН антенны ЦП, Ψ_{20} — угол между Z_A и образующей конуса ДН, опирающегося на контур равной чувствительности антенны по половинной мощности. Для определения координат радианта метеора условие "зеркальности" должно выполняться как для центрального, так и для каждого из вынесенных пунктов. С учетом того, что ДН ВП шире ДН ЦП, условие (1) примет вид

$$\cos^2 \Psi_1 + \max\{\cos^2 \Psi_{20}, \cos^2 \Psi_{21}, \cos^2 \Psi_{22}\} \leq 1, \quad (2)$$

где Ψ_{21}, Ψ_{22} — углы между вертикалью и прямой, описывающей контур сечения эллиптического конуса ДН ЦП плоскостью, параллельной поверхности земли и проходящей на средней высоте метеорной зоны. Прямые, образующие углы Ψ_{21}, Ψ_{22} , исходят из точек L_1 и L_2 , которые делят пополам базы R_1 и R_2 .

С учетом рассмотренных ограничений задачу оптимизации по критерию минимума структурной избирательности можно сформулировать в таком виде: максимизировать $S(R_i, \varphi_i)$ при ограничениях

$$g_j(R_i, \varphi_i) \geq 0, \quad j = \overline{1, 4}; \quad (3)$$

$$0 \leq \varphi_i \leq \pi, 0 < R_i \leq R_{\max}, \quad i = 1, 2$$

Пусть D — это область, для радиантов метеоров из которой выполняются геометрические условия регистрации для однопозиционной РТС. При переходе к гелиоцентрической системе координат из-за эффекта векторного суммирования скоростей метеороида и орбитальной скорости Земли форма и размеры области D меняются в течение суток и года. В работе [4] рассмотрены области видимости для системы МАРС. Конфигурация и размеры этих областей существенно зависят от времени. Если в радиолокационной системе используется несколько станций, картина еще более усложняется и решить задачу аналитически не представляется возможным. Чтобы оценить функцию

S для радиотехнической системы определения координат радиантов, воспользуемся методом математического моделирования. Разобьем всю гелиоцентрическую сферу на M равновеликих площадок, координаты центров которых могут быть найдены по формулам, приведенным в [5]. Тогда размер общей площади, осматриваемой системой в течение суток, можно оценить по количеству площадок, центры которых (β_i, λ_i) попадают в гелиоцентрическую область D , модифицированную с учетом ограничений (3). Согласно [6] средние квадратические погрешности радиолокационных измерений координат радианта составляют $2,4 \dots 2,7^\circ$. Для обеспечения требуемой точности выберем значение $M = 1600$. При этом минимальное угловое расстояние между центрами площадок составит $4,6^\circ$. Тогда функция S может быть записана как

$$S(R_i, \varphi_i) = \sum_{k=1}^{24} \sum_{l=1}^M p_l B_{l_k}, \quad (4)$$

где p_l — коэффициент, характеризующий распределение радиантов по небесной сфере (среднемесячные значения p_l получают на основании измерений численности и индивидуальных характеристик метеоров);

$$B_{l_k} = \begin{cases} 1, & (\beta_l, \lambda_l) \in D; \\ 0, & (\beta_l, \lambda_l) \notin D, \end{cases}$$

а условия $g(R_i, \varphi_i)$ запишутся следующим образом:

$$\begin{aligned} g_1 &= \sigma A_0 - \sigma A(R_i, \varphi_i); \quad g_2 = \sigma Z_0 - \sigma Z(R_i, \varphi_i); \\ g_3 &= t_{\min} - \Delta t_i(R_i, \varphi_i); \quad g_4 = (T_p - t_{\min}) - \Delta t_i(R_i, \varphi_i); \\ g_5 &= R_{\max} - R_i; \quad g_6 = \pi - \varphi_i; \quad i = 1, 2. \end{aligned} \quad (5)$$

Поскольку функции $S(R_i, \varphi_i)$ и $g_j(R_i, \varphi_i)$ нелинейно зависят от оптимизируемых параметров, задача (3) является задачей нелинейного программирования с ограничениями. В работах [7; 8] в связи с наличием эффективных и надежных методов безусловной минимизации рассматривается идея преобразования задачи с ограничениями в надлежащим образом построенную последовательность задач без ограничений. Воспользовавшись методом Розенброка [7], перейдем от условно-экстремальной задачи (3) к безусловной оптимизации модифицированной функции цели вида

$$F(x) = S(x) \Phi_1[g_1(x)] \cdots \Phi_j[g_j(x)], \quad (6)$$

где $\Phi_j \geq 0$ выбираются так, чтобы модифицированная функция обращалась в нуль вне допустимой области и была неотрицательна внутри нее. В простейшем случае множители Φ_j являются двоичной функцией:

$$\Phi_j = \begin{cases} 1, & g_j \geq 0; \\ 0, & g_j < 0. \end{cases}$$

С учетом (4) и (6) сформулируем задачу безусловной минимизации:

$$F(R_i, \varphi_i) = - \sum_{k=1}^{24} \sum_{l=1}^M \left[p_l B_{lk} \prod_{j=1}^6 \Phi_j(g_j(R_i, \varphi_i)) \right] \rightarrow \min, \quad (7)$$

где $g_j(R_i, \varphi_i)$ определяются по формулам (5). Знак минус введен для перехода от процедуры максимизации к процедуре минимизации.

После формулировки критерия оптимальности рассмотрим возможные алгоритмы решения задачи (7). Функция $F(R_i, \varphi_i)$, экстремум которой нужно найти, в общем случае многоэкстремальна, непрерывна и неявно зависит от параметров R_i, φ_i . Исходя из анализа существующих методов нулевого порядка, которые применимы в данном случае [8—10], выберем алгоритм решения задачи (7), сочетающий метод деформируемого многогранника [10] и метод с несколькими начальными точками [8].

Рассмотренный алгоритм позволил: 1) в результате осуществления процедуры оптимизации (3) для вектора координат $\bar{X} = (R_i, \varphi_i)$ получить вектор \bar{X}_{opt} ; 2) рассчитать структурный фактор избирательности P_S^{-1} как отношение вероятностей регистрации данного радианта при заданном и оптимальном расположении вынесенных пунктов (рис. 1—2).

В таблице приведены исходные координаты ВП $\bar{X} = (R_i, \varphi_i)$, соответствующие системе МАРС, и оптимальные координаты $\bar{X}_{\text{opt}} = (R_{i\text{opt}}, \varphi_{i\text{opt}})$, рассчитанные для каждого месяца в течение года (данные июня и июля объединены).

На рис. 1—2 отражены зависимости структурного фактора избирательности P_S^{-1} от гелиоцентрической широты β' и долготы

Координаты	Векторы \bar{X}	Векторы \bar{X}_{opt} для месяцев											
		I	II	III	IV	V	VI-VII	VIII	IX	X	XI	XII	
R_1 , км	4,32	8,05	7,65	8,39	7,84	7,81	8,16	7,58	5,20	7,59	7,76	8,43	
R_2 , км	8,42	7,83	6,89	7,72	7,56	6,99	6,81	7,29	7,64	6,73	5,51	7,11	
φ_1 , рад	0,59	1,17	1,14	0,99	1,53	1,69	1,00	1,17	0,95	1,22	1,39	1,33	
φ_2 , рад	1,92	1,92	1,85	1,76	2,07	2,27	1,80	2,02	2,01	2,06	2,34	2,02	

$\lambda' - \lambda_a$ для различных месяцев (кривая 1 — январь; 2 — март; 3 — июнь; 4 — август; 5 — октябрь; 6 — декабрь).

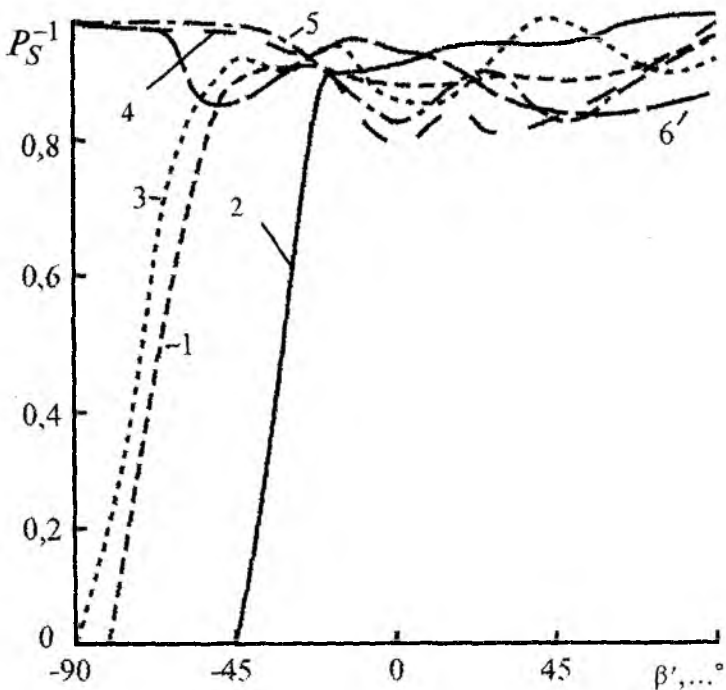


Рис. 1

Анализ графиков показывает, что вид функций $P_S^{-1}(\beta')$ и $P_S^{-1}(\lambda' - \lambda_a)$ не остается постоянным в течение года. Поскольку пункт наблюдения расположен в Северном полушарии, южные радианты видны не всегда. Так, для января—июня существует значение $\beta' < 0$, при котором начинает резко проявляться структурная избирательность (для марта $\beta' = -10^\circ$, для января, июня $\beta' = -45^\circ$). Восстановление истинных распределений в области $\beta' < 30^\circ$ для всех месяцев становится невозможным. Поэтому в дальнейшем при оценке структурного фактора избирательности следует ограничиться значениями $\beta' > 0$ и, опираясь на гипотезу о симметрии распределения радиантов относительно плоскости эклиптики, подтвержденную в [11], распространить данные на южную полусферу.

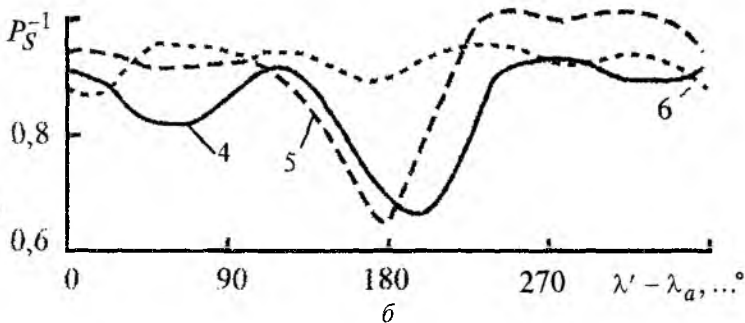
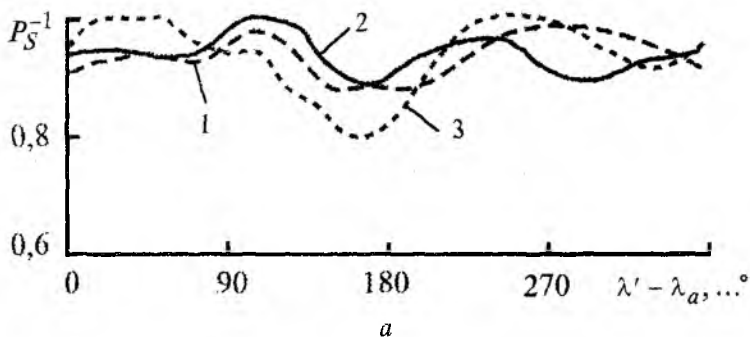


Рис. 2

При положительных значениях β' для этих месяцев структурный фактор проявляется слабее и оценивается примерно в 0,9...0,95. Для августа—октября наибольшее влияние структурного фактора проявляется в диапазоне широт $0 < \beta' < 30^\circ$, в декабре характер зависимости $P_S^{-1}(\beta')$ сглажен.

Функция $P_S^{-1}(\lambda' - \lambda_a)$ также изменяется от месяца к месяцу, хотя общий вид кривых сохраняется. Но для зимних месяцев зависимость $P_S^{-1}(\lambda' - \lambda_a)$ более равномерна, в то время как в июне—октябре имеется явно выраженный антиапексный минимум.

Влияние структурного фактора проявляется также в изменении размеров областей небесной сферы, наблюдаемых в системе определения координат радиантов. Расчеты показали, что наблюдаемая РТС-площадь небесной сферы из-за влияния структурного фактора умень-

шается в среднем за сутки на 15...20 %, а в вечерние часы уменьшение может доходить до 90 %. С учетом неравномерного распределения радиантов в пределах наблюдаемых областей, потери информации для различных месяцев колеблются в пределах 8...20 % и составляют в среднем 14,5 %. Аналогичные оценки были получены при исследовании АВХ отраженных сигналов, регистрировавшихся на киноплёнку в 1968—1969 годах. Потери информации для расчета радиантов в июле 1967 г. составили 17 %, в декабре 1968 г. — 21 %, в августе 1969 г. — 15 %, в декабре 1969 г. — 8 %, в среднем — около 15 %. Следует подчеркнуть, что потери не являются случайными и поэтому их нельзя компенсировать, просто увеличив объем выборки; они искажают распределение как радиантов, так и элементов орбит метеорных тел.

Таким образом, исследование избирательности многопозиционной метеорной РТС позволило:

1. Разработать методику оценки и учета дополнительного структурного фактора избирательности, который возникает при определении координат радиантов метеоров.

2. Провести оптимизацию параметров метеорной РТС с использованием критерия минимума структурной избирательности. В результате оптимизации геометрии позиций системы количество метеоров, координаты радиантов которых определяются в пределах заданной погрешности, увеличивается в среднем за сутки на 15 %, варьируясь в зависимости от месяца.

3. Скорректировать существующие оценки статистической модели распределения параметров метеорных тел вблизи орбиты Земли с учетом структурной избирательности.

Список литературы: 1. Волощук Ю.И., Милютченко И.А. Исследование структурной избирательности многопозиционной метеорной РТС. 1. Постановка задачи — См. статью в настоящем сборнике. 2. Метеорная автоматизированная радиолокационная система / Б.Л. Кащеев, Ю.И. Волощук, А.А. Ткачук и др. // Метеор. исслед. 1977. № 4. С. 11—61. 3. Глобальная сеть РТС для метеорных исследований: Материалы Мирового центра данных Б. М.: ВИНТИ, 1981. 76 с. 4. Ткачук А.А., Маценко С.В. Области видимости метеорных радиантов // Метеор. исслед. 1981. № 7. С. 63—73. 5. Волощук Ю.И., Милютченко И.А. О представлении распределения параметров потока метеорных тел по небесной сфере // Там же. 1986. № 12. С. 63—74. 6. Кащеев Б.Л., Лебединец В.Н., Лагутин М.Ф. Метеорные явления в атмосфере Земли. М.: Наука, 1967. 260 с. 7. Фиакко А., Мак-Кормик Г. Нелинейное программирование. Методы последовательной безусловной минимизации: Пер. с англ. М.: Мир, 1972. 240 с. 8. Реклейтис Г., Рейвиндраган А., Рэгсдел К. Оптимизация в технике: В 2 кн.: Пер. с англ. М.: Мир, 1986. Т. 1. 350 с.; Т. 2. 320 с. 9. Евдокимов А.Г. Минимизация функций и ее приложение к задачам автоматизированного управления инженерными сетями. Х.: Выща шк. Изд-во при Харьк. ун-те, 1985. 288 с. 10. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование: Пер. с англ. М.: Мир, 1975. 534 с. 11. Кащеев Б.Л., Новоселова Н.В. Результаты измерения радиантов на различных географических широтах // Пробл. косм. физики. 1975. № 10. С. 58—67.