

# ОПТИМАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА РАДИОМЕТЕОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ. I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

*Б. Л. Кашеев, Ю. И. Волощук, А. А. Дьяков,  
В. А. Нечитайленко*

Харьков

Метеорная радиоэлектроника стоит на пороге нового этапа своего развития. В [1] отмечено, что важнейшие задачи этого периода — разработка оптимальных методик изучения метеорных и связанных с ними геофизических явлений, создание унифицированных измерительных станций (оптимальных метеорных РЛС), максимальная автоматизация наблюдений и обработки радиометеорной информации. Настоящая работа является попыткой анализа и систематического изложения путей решения перечисленных выше задач метеорной радиоэлектроники.

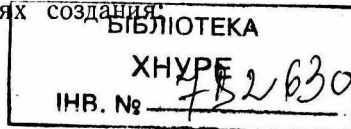
1—1. В настоящее время метеорная радиоэлектроника решает широкий круг задач, важнейшие из которых:

астрономические — определение скоростей, радиантов и орбит метеоров, исследование распределений радиантов и параметров орбит радиометеоров;

геофизические — исследование физических характеристик атмосферы на высоте 80—110 км, изучение ветрового режима на этой высоте;

прикладные — исследование закономерностей метеорного распространения радиоволн метрового диапазона для передачи информации на расстояния до 1800—2000 км.

Развитие теории и практики метеорных РЛС шло и продолжает идти в направлениях создания



специализированных метеорных РЛС для изучения численности радиометеоров, исследования распределения радиантов статистическими методами;

специализированных метеорных РЛС для изучения ветрового режима методом измерения доплеровского сдвига частоты отраженного от метеора радиосигнала;

многостанционных радиолокационных комплексов для решения астрономических задач.

Следует отметить, что метеорные РЛС, практически используемые в настоящее время, часто не являются строго специализированными, а крупнейшие радиометеорные измерительные комплексы [2—4] решают параллельно все три задачи. Однако эта классификация все же отражает существующие в практике разработки и создания РЛС тенденции, поэтому удобна для проводимого нами анализа.

1—2. Процесс обработки информации, получаемой на метеорных РЛС, можно разделить на три этапа, выполняемые последовательно, [5] — предварительную, первичную и вторичную обработки. Под предварительной обработкой мы понимаем обнаружение, разрешение и различение сигналов. Первичная обработка заключается в определении параметров сигнала, представлении его в виде, пригодном для последующей обработки, заключающейся в расчетах физических характеристик метеора, и опосредствованно — атмосферы. Эти расчеты составляют этап вторичной обработки.

Задача определения оптимальных алгоритмов обработки радиометеорной информации на всех трех этапах является определяющей при разработке радиометеорных измерительных устройств. Следует подчеркнуть, что проблема оптимизации алгоритмов обработки (по крайней мере на первых двух этапах) в значительной степени переплетается с задачей реализации этих алгоритмов в автоматических устройствах, поскольку оптимальная обработка часто может быть реализована только применением машинных алгоритмов.

Задача оптимизации алгоритмов предварительной обработки применительно к импульсным метеорным РЛС с реализацией их в автоматических регистраторах в основном к настоящему времени уже решена [6—11 и др.]. На этапе вторичной обработки успешно применяются ЭВМ, причем оптимальные оценки при анализе информации получают классическими методами теории статистических решений. Оптимизация же алгоритмов первичной обработки является в настоящее время наиболее сложной задачей, особенно в том случае, когда необходимо существенно уменьшить объем информации после первичной обработки [5, 12, 13]. В работах [14—16] рассматриваются вопросы первичной обработки информации применительно к трем главным направлениям разработки оптимальных метеорных РЛС.

Известно, что задача оптимальной обработки радиометеорной информации является статистической задачей и не может быть

строга решена без привлечения результатов и методов теории статистических решений [17]. Рассматриваемая нами статистическая модель [18, 19 и др.] включает исследуемые параметры метеора, тела, породившие его, и атмосферы (индивидуальные и статистические). Эта совокупность параметров может рассматриваться в качестве сообщения  $\lambda$  в пространстве  $\lambda$ . Сигнал в пространстве  $S$  связан с сообщением

$$s = T(\lambda),$$

где  $s$  — сигнал.

Оператор  $T$  определяет способ формирования сигнала из сообщения и в рассматриваемой нами задаче является рандомизированным оператором. Измерение  $m$  связано с сообщением

$$m = Y(s, n, a),$$

где  $n$  — помеха в интерпретируемом канале связи;

$a$  — эквивалентная помеха, характеризующая степень увеличения энтропии сообщения вследствие того, что для некоторых компонент вектора  $m$  отсутствуют измерения и известны только статистические характеристики;

$Y$  — алгоритм предварительной и первичной обработки.

Преобразование измерения  $m$  в соответствии с алгоритмом вторичной обработки  $W$  позволяет получить решение или оценку  $\lambda^*$ , воспроизводящую переданное сообщение  $\lambda$ , т. е.

$$\lambda^* = W(m),$$

или

$$\lambda^* = W\{Y[T(\lambda), n, a]\};$$

при этом структура пространства оценок совпадает со структурой пространства сообщений.

1—3. Задача оптимизации алгоритмов обработки радиометeorной информации является частным случаем задачи отыскания оптимального правила принятия решения [18] и может быть определена при использовании байесовского критерия качества:

$$\rho = \iint_{\lambda^* \lambda} r(\lambda^*, \lambda) p(\lambda) p(\lambda^*/\lambda) d\lambda d\lambda^*,$$

где  $r(\lambda^*, \lambda)$  — относительная значимость совместной реализации сообщения  $\lambda$  и оценки  $\lambda^*$  (функция стоимостей);

$p(\lambda)$  — априорная плотность вероятности сообщений;

$p(\lambda^*/\lambda)$  — условная плотность вероятности оценки  $\lambda^*$  при реализации сообщения  $\lambda$ .

В работах [21, 22] показано, что для отыскания оптимальных алгоритмов восстановления функции необходимо задать какой-либо соответствующей исследуемому случаю байесовской математической моделью. Полученные в результате применения к ней методов математической статистики алгоритмы заведомо оптимальны (или квазиоптимальны, если в процессе вывода были допущены какие-либо упрощения) в тех условиях, в которых решается задача. Кроме того, в работе [22] доказывается инва-

риантность оптимальных алгоритмов к априорным распределениям на основании их асимптотического подобия. Известно, что априорные вероятности играют важнейшую роль в применении теории статистических решений. Если априорные вероятности не существуют, применение этой теории в данном случае не имеет смысла. Однако, когда априорные вероятности существуют (или могут считаться существующими), теория может использовать различные методы для отыскания решений даже в случае, когда априорные вероятности не известны или не доступны исследователю. В практических приложениях необходимо тщательно исследовать назначение стоимостей и выбор функции потерь, так как именно этим обеспечивается связь теоретической задачи с конкретной ситуацией.

Функция потерь, определяющая потери информации от принятия неправильного решения, не может быть в общем случае определена строго [18]. В то же время выбор той или иной функции влияет на вид алгоритмов обработки. Эвристический анализ проблемы показывает, что функцию стоимостей следует определять через меру точности определения параметров  $\lambda$ . Однако при этом следует помнить, что в силу неизотропности пространства сообщений  $\lambda$  установление весов отдельных параметров  $\lambda$  в общей мере точности является само по себе неформальной задачей.

Особенностью некоторых частных задач, решаемых метеорной радиоэлектроникой, особенно геофизических задач, в отличие от задач статистической теории связи является то, что конечной целью многих исследований является получение оценок самой функции  $p(\lambda)$  при минимуме априорной информации. Эта особенность является общей для всей геофизики. Как правильно отмечено в работе [20], информационная содержательность наблюдений в геофизике обычно оказывается значительно ниже, чем в радиофизике, при этом оценки эффективности интерпретации (обработки данных) и исследование пороговых условий, при которых интерпретация еще имеет смысл, приобретают весьма важное значение.

1—4 Рассмотрим основные особенности задачи оптимальной обработки радиометеорной информации применительно к трем главным направлениям разработки метеорных РЛС.

При исследовании численности алгоритм вторичной обработки элементарен и заключается в получении оценок распределений численности по амплитуде, длительности и радиантам. Основные трудности при построении таких устройств заключаются в отыскании оптимальных алгоритмов предварительной и первичной обработок. В отличие от регистраторов индивидуальных характеристик метеоров при регистрации численности важной задачей является расширение динамического диапазона регистрируемых параметров в основном за счет перехода к более мелким частицам, а это требует предельного понижения пороговых уровней

регистрации. Вследствие существенной нелинейности закона распределения численности в функции амплитуды понижение порога приводит к резкому увеличению интенсивности входящего потока информации. Отсюда вытекает задача построения таких устройств предварительной обработки, которые, с одной стороны, обеспечили бы оптимальное по выбранному критерию выделение потока сигналов из шумов, а, с другой стороны, обладали бы достаточной разрешающей способностью для регистрации всех одновременно существующих сигналов. При регистрации численности также остро стоит вопрос обнаружения конца пакета отраженных от метеора импульсов при наличии нижепороговых флуктуаций.

Необходимо отметить еще одну специфическую особенность задачи построения статистических регистраторов численности. Конечная цель измерений на таких регистраторах состоит в получении функций распределения некоторых параметров метеоров. Использование байесовских критериев для синтеза оптимальных устройств требует знания априорных функций распределения исследуемых параметров. Выход из этого затруднения заключается, по-видимому, в последовательном построении все более сложных устройств. Считая на первом этапе априорные распределения известными, можно построить устройство, являющееся квазиоптимальным и обеспечивающим получение дополнительной информации об априорных распределениях. При правильно выбранной функции стоимостей последовательное применение описанной процедуры приведет к построению оптимальной структуры. Однако количество получаемой на каждом шаге дополнительной информации будет уменьшаться и в пределе для оптимальной системы оно будет равно нулю. Проблема определения разумной степени сложности алгоритмов обработки, реализуемых в таких регистраторах, имеет, таким образом, исключительно важное значение.

1—5. При измерениях дрейфов метеорных следов оптимальный алгоритм первичной обработки сводится к определению оценок функции  $\varphi(t)$  либо  $\frac{\partial \varphi(t)}{\partial t}$  [16]. Широко используемый в настоящее время способ оценки математического ожидания производной фазы по измерению доплеровского смещения частоты методом биений не является оптимальным; дисперсия и смещение оценок, полученные таким образом, весьма велики. При необходимости разделения во времени первичной и вторичной обработок для обеспечения минимума потерь информации приходится усложнять первичную обработку включением в нее ряда операций собственно вторичной обработки, как это было определено выше. Функция  $\varphi(t)$  в общем случае может рассматриваться в виде

$$\varphi(t) = \varphi_0(t) + \varphi_n(t) + \varphi_a(t),$$

где  $\varphi_0(t)$  — искомая зависимость;  
 $\varphi_n(t)$  — случайное центрированное расхождение;  
 $\varphi_a(t)$  — неслучайное неизвестное расхождение вследствие влияния диффузии, дифракции и других причин; сюда же может быть включено расхождение за счет турбулентности, если последняя не рассматривается как составляющая  $\varphi_0(t)$ , выявляемая на этапе вторичной обработки. Вследствие этого необходимо в результате первичной обработки выделить наиболее информативную часть  $\varphi(t)$ , поскольку  $\varphi_a(t)$  является существенно нестационарной в области существования  $\varphi(t)$ .

Более подробно этот вопрос обсуждается в работе [16].

Выше было отмечено, что при обработке геофизической информации важное значение приобретает исследование пороговых условий, при которых интерпретация еще имеет смысл. Можно показать, что информационная содержательность значительной части наблюдательных данных, получаемых в настоящее время на ветровых метеорных РЛС, настолько низка, что позволяет привлекать только методы качественной интерпретации [20]. Это в значительной мере объясняется неоптимальностью алгоритмов первичной и вторичной обработок соответствующих ветровых метеорных РЛС.

1—6. При решении астрономических задач модель пространства сообщений известна наиболее полно, поэтому, как было отмечено выше, оценка  $\lambda^*$  достаточно хорошо представляет сообщение  $\lambda$ . При этом задача получения достоверных оценок сводится к задаче построения оптимальных алгоритмов обработки измерения  $m$ , уменьшения влияния векторов  $a$  и  $n$ .

На этапе предварительной обработки это сводится, в первую очередь, к построению оптимальных обнаружителей сигналов, во вторую — к точному учету селективности устройств различения при формировании на выходе ординарного потока. На этапе первичной обработки необходимо, во-первых, оптимизировать алгоритмы распознавания сигналов, т. е. по введенному критерию наиболее правильно разделить пространство сигналов на подпространства, соответствующие различным типам сообщений, во-вторых, получение оценок параметров сигнала, необходимых на этапе вторичной обработки, заключается в преобразовании улучшенных, сглаженных сигналов, что приводит к оптимальным алгоритмам фильтрации. Здесь же необходимо оптимизировать параметры системы обработки с целью снижения потерь информации за счет отказов обслуживания.

Вторичная обработка при решении астрономических задач в виде, определенном выше, носит детерминистический характер. Поэтому условие оптимальности в рассматриваемом смысле не применимо к этому виду обработки.

1—7. В основе изложенной выше постановки задачи оптимальной обработки радиометеорной информации лежит единый

информационно-статистический подход, основанный на предположении случайности экспериментального материала в области наблюдения. Этот, обладающий большой общностью подход, объединяет в себе задачу выбора критериев, построения оптимальных алгоритмов, максимального использования априорной информации. Решение задачи уменьшения потерь информации в процессе обработки на путях построения оптимальных алгоритмов логично приводит к необходимости использования в первую очередь машинных алгоритмов, т. е. является теоретическим обоснованием необходимости полной автоматизации обработки радиометеорной информации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Решение XIII Пленума ККМ Астросовета АН СССР. Киев, ноябрь, 1971.
2. Б. Л. Кашеев, И. А. Делов, Б. С. Дудник, А. А. Ткачук. Радиолокационный комплекс для исследования слабых метеоров. Сб. «Радиотехника», вып. 16. Изд-во ХГУ, Харьков, 1971.
3. Б. Г. Бондарь, Б. С. Дудник, А. А. Ткачук. Передающее и антенное устройства метеорной станции высокой эффективной чувствительности. «Вестник ХПИ № 22 (70), Радиотехника», вып. 1. Изд-во ХГУ, Харьков, 1967.
4. G. S. Hawkins. The Harvard Radio Meteor Project. Smith. Contr. to Astrophysics, vol. 7, 53—62, 1963.
5. А. А. Дьяков. Об одном аспекте проблемы автоматизации обработки данных радиолокационных исследований метеорных явлений. Сб. «Радиотехника», вып. 16. Изд-во ХГУ, Харьков, 1971.
6. В. А. Нечитайленко. Система защиты от помех метеорной станции. «Кометы и метеоры», 1970, № 18.
7. Ю. И. Волощук, В. А. Нечитайленко. Регистратор метеорной станции высокой эффективной чувствительности. «Вестник ХПИ № 22 (70), Радиотехника», вып. 1. Изд-во ХГУ, Харьков, 1967.
8. Ю. И. Волощук, В. А. Нечитайленко. Методика определения оптимальных параметров АФС метеорных регистраторов. «Вестник ХПИ № 36 (84), Радиотехника», вып. 2. Изд-во ХГУ, Харьков, 1969.
9. В. А. Нечитайленко. Оптимальные регистраторы метеорных РЛС. Сб. «Радиотехника», вып. 16. Изд-во ХГУ, Харьков, 1971.
10. В. А. Нечитайленко. Оптимальные параметры и селективность дискретных регистраторов метеорных РЛС. Сб. «Радиотехника», вып. 16. Изд-во ХГУ, Харьков, 1971.
11. Ю. И. Волощук. Статистический анализатор численности радиометеоров. Сб. «Радиотехника», вып. 16. Изд-во ХГУ, Харьков, 1971.
12. В. А. Нечитайленко. Результаты исследования двух алгоритмов автоматической обработки дрейфа метеорных следов. Тезисы доклада на XIII Пленуме ККМ. Изд-во «Наука», 1971.
13. А. А. Дьяков. Вопросы автоматической обработки параметров орбит индивидуальных метеоров. Тезисы доклада на XIII Пленуме ККМ. Изд-во «Наука», 1971.
14. Ю. И. Волощук. Оптимальная обработка радиометеорной информации. II. Обнаружение потока сигналов при регистрации численности метеоров. См. статью настоящего сборника.
15. В. А. Нечитайленко. Оптимальная обработка радиометеорной информации. III. Оптимальные машинные алгоритмы первичной обработки радионаблюдения дрейфов метеорных следов. См. статью настоящего сборника.
16. А. А. Дьяков. Оптимальная обработка радиометеорной информации. IV. О признаках распознавания при классификации отражений в автомате. См. статью настоящего сборника.

17. М. А. Гиршик, Д. Блэкуэлл. Теория игр и статистических решений. Изд-во Иностран. лит., 1958.

18. Д. Миддлтон. Введение в статистическую теорию связи. Изд-во «Советское радио», 1962.

19. С. Е. Фалькович. Оценка параметров сигнала. Изд-во «Советское радио», 1970.

20. Ф. М. Гольцман. Статистические модели интерпретации. Изд-во «Наука», 1971.

21. Р. Л. Стратонович. Эффективность методов математической статистики в задачах синтеза алгоритмов восстановления функций. «Автоматика и телемеханика», 1967, № 1.

22. Р. Л. Стратонович. Существует ли теория синтеза оптимальных адаптивных, самообучающихся и самонастраивающихся систем. «Техническая кибернетика», 1969, № 1.