

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ПРОБЛЕМЕ ВЫДЕЛЕНИЯ СИГНАЛОВ,
ОТРАЖЕННЫХ ОТ МЕТЕОРНЫХ СЛЕДОВ, ИЗ ШУМА

Одна из важнейших характеристик комплекса метеорных тел в Солнечной системе — интегральная плотность потока частиц. В работе [1] по наиболее надежным экспериментальным результатам построена зависимость интегральной плотности потока N от массы частиц M вида $\lg N = -14,5 - 1,25 \lg M$ $10^{-6} \text{ г} < M < 10^{-4} \text{ г}$ (1); $\lg N = -9,8 - 0,55 \lg M$ $10^{-11} \text{ г} < M < 10^{-8} \text{ г}$ (2).

Зависимость (1) получена по наблюдениям ионизированных метеорных следов в атмосфере Земли радиолокационным методом, ее достоверность (обеспеченность измерениями) растет с уменьшением массы.

Выражение (2) построено по данным прямых регистраций столкновений частиц с датчиками, установленными на борту космических аппаратов. Достоверность модели (2) падает с ростом массы.

Диапазон масс $M = (10^{-7} - 10^{-6}) \text{ г}$, где происходит переход от (1) к (2), не исследован. Чтобы получить информацию о распределении частиц в этом диапазоне масс и тем самым увязать данные наземных и прямых наблюдений, необходимо повысить эффективную чувствительность метеорных радиолокационных станций (МРЛС).

Максимальное значение напряжения сигнала, рассеянного ненапыщенным метеорным следом, связано с параметрами аппаратуры и характеристиками следа соотношением [2]

$$U_m = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{\lambda}{R} \right)^{3/2} (r_{\text{вх}} P G_1 G_2)^{1/2} \alpha_{\text{эфф}} \left(\frac{e^2}{mc^2} \right). \quad (3)$$

Здесь P — мощность передатчика; G_1 и G_2 — коэффициенты направленности передающей и приемной антенн по отношению к изотропному излучателю; λ — длина волны МРЛС; R — наклонная дальность от МРЛС до точки зеркального отражения на следе; $r_{\text{вх}}$ — входное сопротивление приемника; $\alpha_{\text{эфф}}$ — эффективная линейная электронная плотность следа; e , m — заряд и масса электрона; c — скорость света.

Рассеянный ионизированным следом сигнал будет зарегистрирован, если $U_m > U_n$, где U_n — пороговое напряжение обнаружителя.

Следовательно, повысить эффективную чувствительность МРЛС можно увеличением U_m или уменьшением U_n . Первое сопряжено со значительными техническими трудностями и затратами, поскольку, как следует из (3), требует увеличения мощности передатчика, размеров антенн и т. д. Так, самый мощный в Европе метеорный комплекс [3] уже включает передающее устройство мощностью 1 МВт в импульсе и антенные системы размерами в сотни метров. Второй путь заключает-

повышении порогового уровня регистрации и извлечении информации о метеорах из-под шумов. Реализовать его можно алгоритмическими средствами без существенных технических переделок и экономических затрат.

Любой алгоритм обработки радиосигналов, маскированных шумами, должен обеспечить накопление энергии на интервале наблюдения (t_1, t_2) , а наилучший накопитель — оптимальный фильтр [4]. При импульсной локации задачу оптимального обнаружения сигнала в шумах можно решать либо для каждого отдельного отраженного импульса, либо для пакета отраженных импульсов.

В первом случае эффективность фильтрации тем выше, чем шире полоса зондирующих сигналов, во втором — чем точнее известна огибающая пакета импульсов. Специфика задачи радиолокации метеорных следов требует использования простых зондирующих сигналов (радиоимпульсов с прямоугольной огибающей и немодулированным заполнением), а огибающая пакета отраженных импульсов (амплитудно-временная характеристика (АВХ) отраженного сигнала) заранее неизвестна и зависит от параметров частицы и атмосферы на высоте образования следа, т. е. тех характеристик, которые необходимо оценить в результате измерений.

Таким образом, алгоритм решения задачи выделения отраженных сигналов из шума следует искать в рамках наиболее общего вероятностного подхода, основанного на различии статистических свойств истого шума $n(t)$ и аддитивной смеси отраженного сигнала $s(t)$ с шумом. В этой связи заслуживает внимания идея энергетического подхода к обнаружению и оцениванию уровней (амплитуд) полезных сигналов, замаскированных белым гауссовым шумом [5].

Предлагаемый подход базируется на возможности представления выборочного значения X узкополосного случайного процесса в виде геометрической суммы синфазной X_s и квадратурной X_c составляющих $X = X_c + X_s$ (4), где $|X_c|$ и $|X_s|$ — нормально распределенные случайные величины с нулевым средним и одинаковыми дисперсиями σ^2 , если входное колебание узкополосного тракта — чистый шум $y(t) = n(t)$, или $|X_c|$ и $|X_s|$ — нормально распределенные случайные величины с ненулевым средним и одинаковыми дисперсиями σ^2 , при $y(t) = s(t) + n(t)$.

Известно, что энергию конечной реализации случайного процесса можно приближенно выразить суммой квадратов статистически независимых случайных величин (отсчетов, взятых в моменты времени $k\Delta t$) с равными дисперсиями

$$\xi_i = \frac{1}{\sigma^2} \sum_{t=1}^{N_c} |X_t|^2, \quad (5)$$

где

$$N_c = 2N'_c, \quad N'_c = 2T\Delta F, \quad T = t_2 - t_1;$$

ΔF — полоса пропускания узкополосного тракта приемного устройства (УПЧ).

Тогда численная оценка приведенной энергии процесса на интервале анализа (t_1, t_2) представляет собой реализацию случайной величины ξ , подчиняющейся χ^2 -распределению с N_c степенями свободы. Причем, когда сигнал $s(t)$ отсутствует в реализации $X(t)$, статистика ξ имеет центральное распределение χ^2 с плотностью вероятностей [6]

$$P(\xi) = \frac{1}{2^{\alpha/2} \Gamma(\alpha/2)} \xi^{\alpha/2 - 1} \exp(-\xi/2). \quad (6)$$

Здесь $\alpha = N_c$, $\Gamma(\mu)$ — гамма-функция, $\xi > 0$.

При наличии полезного сигнала $s(t)$ статистика ξ имеет нецентральное распределение χ^2 с тем же числом степеней свободы и параметром нецентральности λ :

$$P'(\xi) = \frac{\exp(-(\xi + \lambda)/2) \xi^{\alpha/2 + 1}}{2^{\alpha/2}} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{(\lambda \xi/4)^j}{j! \Gamma(j + \alpha/2)}, \quad (7)$$

$$\xi \geq 0, \quad \lambda > 0.$$

Величина параметра λ может быть взята в качестве меры оценивания наличия или отсутствия сигнала $s(t)$ в принятом колебании. Сравнив экспериментальную оценку параметра нецентральности λ с некоторым пороговым значением λ_n , можно принять решение в задаче обнаружения.

Если случайная величина ξ имеет нецентральное распределение χ^2 с N_c степенями свободы, то ее математическое ожидание и дисперсия равны [6]

$$M[\xi] = N_c + \lambda; \quad (8)$$

$$D[\xi] = 2N_c + 4\lambda. \quad (9)$$

Таким образом, решение задачи отыскания оценки параметра λ распределения χ^2 заключается в формировании по выборочным отсчетам $(X_i, i = 1, N_c/2)$ узкополосного колебания $X(t)$ реализаций случайной величины ξ ($\xi_i, i = 1, N_c/2$) в соответствии с выражением (5) и вычислении оценки их математического ожидания $M[\xi]$. Тогда оценка параметра $\hat{\lambda}$: $\hat{\lambda} = \hat{M}[\xi] - N_c$ (10). Вместе с тем в работе [5] показано, что параметр нецентральности λ численно равен отношению энергии сигнала E_c на интервале анализа (t_1, t_2) к двусторонней спектральной плотности шума N_{02} : $\lambda = E_c/N_{02}$ (11).

Следовательно, зная энергетические характеристики шума σ^2 , N_{02} в полосе пропускания ΔF узкополосного тракта, интервал анализа (t_1, t_2) (что равносильно заданию величины N_c), оценку $M[\xi]$, можно рассчитать и оценку энергии полезного сигнала в заданном интервале

$$E_c = \hat{\lambda} N_{02} (\hat{\lambda} - \lambda_n) = (\hat{M}[\xi] - N_c) N_{02} (\hat{\lambda} - \lambda_n); \quad (12)$$

$$P_c = \hat{\lambda} P_{ш1} (\hat{\lambda} - \lambda_n) = (\hat{M}[\xi] - N_c) P_{ш1} (\hat{\lambda} - \lambda_n), \quad (13)$$

где $1(r)$ — единичная функция включения: $1(r) = 1, r > 0; 1(r) = 0, r \leq 0$. Итак, энергетический подход с позиций анализа нецентраль-

Распределения χ^2 сумм нормированных σ^2 выборочных значений в нульполосного случайного процесса позволяет по единой методологии решать задачи обнаружения и оценивания энергии полезного сигнала, замаскированного белым гауссовым шумом.

Список литературы: 1. Лебединец В. Н. Аэрозоль в верхней атмосфере и космическая пыль. Л., 1981. 272 с. 2. Кащеев Б. Л., Лебединец В. Н., Лагутин М. Ф. Метеорные явления в атмосфере Земли. М., 1967. 260 с. 3. Метеорная автоматизированная радиолокационная система / Б. Л. Кащеев, Ю. И. Волощук, А. А. Ткачук и др. // Метеорные исследования. 1977. № 4. С. 11—61. 4. Левин Ю. С. Оптимальные фильтры и накопители импульсных сигналов. М., 1969. 446 с. 5. Уркович Х. Обнаружение неизвестных детерминированных сигналов по энергии // Тр. Ин-та инж. по электротехнике и радиоэлектронике. 1967. Т. 55, № 4. С. 50—59. 6. Справочник по теории вероятностей и математической статистике / В. С. Корольков, Н. И. Портенко, А. В. Скороход, А. Ф. Турбин. М., 1985. 640 с.

Поступила в редколлегию 20.06.88

УДК 621.396

П. С. СМОРОДОВ

ПОИСК ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОРРЕКТИРУЮЩИХ СВОЙСТВ МОДУЛИРУЮЩИХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ

Псевдослучайные сигналы (ПСС) успешно используются в системах радиолокации, радионавигации и передачи информации. Для расширения спектра в ПСС в качестве модулирующих последовательностей применяются псевдослучайные последовательности (ПСП) с числом элементов 1000—10000 и более, наибольшее распространение среди которых получили линейные ПСП максимальной длины или M -последовательности. Широкое использование M -последовательностей обусловлено простотой их получения и хорошими корреляционными свойствами, что позволяет обеспечить высокую точность измерения параметров движения летательных аппаратов, быструю синхронизацию приемных и передающих устройств и т. д. [1; 2]. Один из наиболее эффективных методов поиска ПСС для средних отношений сигнал-шум на входе — рекуррентный поиск [3]. Однако данный метод поиска не учитывает корректирующих свойств M -последовательностей и их сегментов, что является его недостатком и приводит к увеличению времени поиска в результате введения интервала корреляционной проверки синхронизма между принимаемым и опорным сигналами.

В целях сокращения времени поиска предлагается анализировать ПСП сегментами длины n элементов, причем $k < n \leq N$, где k — степень образующего полинома; $N = 2^k - 1$ — период ПСП. При этом сегмент из n элементов можно рассматривать как слово линейного помехоустойчивого (n, k) кода, обладающего некоторой избыточностью, которую можно применять для уменьшения времени поиска.

Поисковую процедуру представим следующим образом. Производится прием n элементов ПСП. Принятый вектор анализируется на