ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИОНОСФЕРНОГО РАДИОКАНАЛА НА ОСНОВЕ МНОГООКОННОГО МЕТОДА СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Вертоградов Г.Г., Мятежников Ю.П., Минеев Д.А., Вертоградов В.Г.

Ростовский государственный университет, физический факультет, кафедра радиофизики
344090, г. Ростов-на-Дону, ул.Зорге 5, E-mail: vgg@phys.rsu.ru

Построение адекватной модели ионосферного радиоканала неизбежно сталкивается с трудностями выделения факторов, определяющих структуру поля декаметровых волн, характеристики распространения парциальных лучей, природу и статистические свойства шумов в точке приема. Для экспериментального изучения процессов распространения и ответа, в том числе, на поставленный вопрос, часто применяются спектральные методы анализа сигналов, отраженных от ионосферы. Возникающие при этом проблемы и противоречивые результаты [1] обусловлены выбором алгоритма оценки спектральной плотности мощности (СПМ) по выборке временного ряда конечной длины и методом получения несмещенных и состоятельных оценок СПМ. В связи с этим, в настоящем сообщении излагается подход для определения характеристик ионосферного распространения радиоволн, основанный на многооконном методе спектрального анализа [2]. Преимущества предлагаемого подхода оценки СПМ состоят в детерминированном выборе спектральных окон, способности работать с короткими временными выборками, дисперсионный анализ дискретных компонент, высокое спектральное разрешение.

При многооконном методе оценки СПМ исходим из общего спектрального представления Крамера стационарного процесса [2] в виде интеграла Фурье-Стилтьеса:

$$x(t) = \int_{-0.5}^{0.5} \mathrm{e}^{i2\pi tf}\, dz(f), \qquad (1)$$

где $dz(f)$ – случайный процесс с некоррелированными приращениями и нулевым математическим ожиданием. Причем $dz(f)$ связано с СПМ соотношением $s(f)df = \left\langle \left| dz(f) \right|^2 \right\rangle$.

Поскольку задача состоит в оценке $dz(f)$ дискретной временной выборки конечной длины N, то, выполняя над (1) ДПФ, получаем основное уравнение с ядром Дирихле:

$$y(f) = \int_{-0.5}^{0.5} \frac{\sin N\pi(f-\nu)}{\sin \pi(f-\nu)} dz(\nu),$$

где $y(f)$ получено ДПФ от $x(t)$.

Решение в окрестности $(f_0 - W, f_0 + W)$ некоторой частоты f_0 записывается с использованием разложения по вытянутым сфероидальным волновым (ВСВ) функциям $v_n^{(k)}(N,W)$, которые являются собственными функциями ядра Дирихле:

$$\hat{z}_k(f, f_0) = \sum_{k=0}^{K-1} U_k(N,W; f - f_0) \frac{y_k(f_0)}{\lambda_k(N,W)},$$

где $U_k(N,W;f)$ – ДПФ от $v_n^{(k)}(N,W)$, W – порядок функции, λ_k – соответствующие собственные значения, $y_k(f_0)$ вычисляется по выборке x_n путем ДПФ с весовой функцией $v_n^{(k)}(N,W)$, а K количество используемых весовых функций.

Осредненная по области частот $(f_0 - W, f_0 + W)$ оценка СПМ в силу ортогональности ВСВ функций дается выражением:

$$\bar{s}(f_0) = \frac{1}{2WN} \int_{f_0-W}^{f_0+W} \left| \sum_{k=0}^{K-1} U_k(N,W; f - f_0) \frac{y_k(f_0)}{\lambda_k(N,W)} \right|^2 df = \frac{1}{2NW} \sum_{k=0}^{K-1} \frac{\left| y_k(f_0) \right|^2}{\lambda_k(N,W)}. \qquad (2)$$

Здесь $\hat{s}_k(f) = \left| y_k(f) \right|^2$ – периодограммные оценки СПМ с ВСВ функциями в качестве спектральных окон. Причем (2) есть результат взвешивания K некоррелированных оценок, каждая из которых распределена по χ_2^2, т.е. оценка (2) имеет $2K$ степеней свободы и является состоятельной. Отметим, что состоятельность достигается без частотного сглаживания, а классическая СПМ дается первым слагаемым в (2).

В задаче гармонического анализа (оценки первого момента $dz(\nu)$) предполагается, что процесс состоит из синусоидальных зеркальных компонент с различными частотами и комплексными амплитудами. Такая модель приводит к общему представлению $\left\langle dz(\nu) \right\rangle = \sum_m \mu_m \delta(f - f_m)$, вместо $\left\langle dz(\nu) \right\rangle = 0$ при спектральном анализе. Второй момент $\left\langle \left| dz(\nu) \right|^2 \right\rangle$ соответствует непрерывной рассеянной составляющей спектра сигнала. При наличии единственной зеркальной компоненты с частотой f_0, имеем $\left\langle y_k(f) \right\rangle = \mu_k U_k(N,W;f-f_0)$. Непрерывная компонента спектра вблизи f_0 оказывается в этом случае локально плоской [2], а значение μ оценивается на основе метода интегральной регрессии в окрестности частоты f_0:

$$\hat{\mu}(f) = \left(\sum_{k=0}^{K-1} \int_{f_0-W}^{f_0+W} y_k(f) U_k^*(N,W;f-f_0) df \right) \Bigg/ \left(\sum_{k=0}^{K-1} \int_{f_0-W}^{f_0+W} \left| U_k(N,W;f-f_0) \right|^2 df \right).$$

Вычитая $\hat{\mu}(f)$ из $y_k(f)$, получим оценку непрерывного спектра. Проверка значимости оценки дискретной компоненты основано на дисперсионном отношении $F(f)$ [3] с 2 и $2(K-1)$ степенями свободы:

$$F(f) = \left((K-1) \left| \hat{\mu}(f) \right|^2 \sum_{k=0}^{K-1} \int_{f_0-W}^{f_0+W} \left| U_k(N,W;f-f_0) \right|^2 df \right) \Bigg/ \left(\sum_{k=0}^{K-1} \int_{f_0-W}^{f_0+W} \left| y_k(f) U_k^*(N,W;f-f_0) \right|^2 df \right).$$

Если оценка значима, то форма спектра в окрестности частоты f_0 изменяется. Отметим, что f_0 оценивается по максимумам статистики $F(f)$. Оценки СПМ теперь имеют вид:

$$\bar{s}(f) = \left| \hat{\mu}(f_0) \right|^2 \delta(f-f_0) + \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} \left| y_k(f) - \hat{\mu}(f_0) U_k(N,W;f-f_0) \right|^2 .$$

Эмпирически установленная ширина окрестности f_0, по которой удаляются следы зеркальной компоненты, составляет $2.5W$. ДПФ при получении всех оценок должно выполняться для длины выборки значительно превышающей N (выборка дополняется нулями).

Предложенный многооконный метод применительно к анализу нестационарных сигналов с высокостабильной несущей частотой, отраженных от ионосферы, позволяет:

– достичь высокого спектрального разрешения (хуже [2], чем $1.15/N$);
– на основе формального статистического критерия обнаружить зеркальные составляющие сигнала;
– получить оценку комплексных амплитуд зеркальных компонент;
– оценить СПМ рассеянной компоненты сигнала;
– оценить коэффициент мутности ионосферы β, квадрат которого имеет смысл отношения энергии зеркальной и рассеянной компонент поля в точке приема и является интегральной мерой возмущенности ионосферы;
– оценить доплеровское смещение парциальных зеркальных компонент сигнала.

Отметим, что спектральный метод анализа позволяет также оценить суммарную мощность сигнала, найти уровень шумов и отношение сигнал/шум. Последние две величины могут быть найдены в предположении, что полоса спектрального анализа превышает полосу сигнала. Для этого численно строится гистограмма уровней СПМ, максимум которой соответствует уровню спектральной плотности шумов. Полоса сигнала (диапазон частотного рассеяния) находится по уровню 95% энергии. После этого произведение вероятного уровня СПМ шумов на полосу сигнала дает значение энергии шумов в полосе, согласованной с сигналом. Отношение сигнал/шум находится очевидным образом.

Описанная методика была применена к анализу реальных сигналов с высокостабильной несущей частотой, отраженных ионосферой. В качестве источников таких сигналов использовалась станция точного времени РВМ на трассе Москва–Ростов-на-Дону на частотах 4.996, 9.996, 14.996 МГц.

В процессе обработки сеансов одночастотных измерений установлено, что оптимальной длиной выборки для оценивания дискретных (зеркальных) и непрерывной (рассеянной) компонент сигнала является 20 секунд. В дальнейшем вся обработка проводилась при скользящем окне спектрального анализа длиной 20 сек, а смещение каждого следующего окна относительно предыдущего составляло 10 сек.

Обработка полученных данных за годовой период показала, что в условиях, когда трасса распространения радиоволн освещена, ширина частотного рассеяния сигнала не превышает 0.5 Гц. С переходом к условиям, когда радиотрасса освещена лишь частично или находится в неосвещенной области, происходит уширение диапазона частотного рассеяния, который в этих условиях достигает значений 6 Гц.

В обоих случаях уровень рассеянной компоненты оказывается мал, что говорит о доминирующей роли зеркальных компонент в формировании ионосферного радиоканала.

Дополнительно в ходе обработки экспериментальных данных проводилась оценка корреляционных характеристик рассеянной компоненты. В процессе обработки определялся вид корреляционной функции и временной радиус корреляции. На основе обработки большого количества реализаций было установлено, что по критерию минимального среднеквадратичного отклонения модельной функции от экспериментальной аппроксимация корреляционной зависимости гауссоидой оказалась в большинстве случаев наиболее подходящей. Установлено, что в ночное время суток величина радиуса корреляции меньше, чем в дневное. Для неосвещённой трассы в большинстве случаев значение радиуса корреляции составляет 1-2 секунды, для освещённой – 2-3 секунды.

В результате анализа полученных данных можно однозначно утверждать, что при наклонном распространении декаметровых волн в принимаемом сигнале доминирует зеркальная компонента. Наиболее вероятное значение коэффициента мутности ионосферы составляет 1-5. Значения $\beta << 1$ практически не наблюдаются. Выявлена суточная морфология коэффициента мутности. Основной максимум днем наблюдается для значений 2-4, в ночные часы суток он смещается к значениям 1-2. В дневные часы суток распределение β становится “двугорбым”. Наиболее вероятное значение β в этом случае достигает 15-20, что свидетельствует о приеме исключительно зеркального сигнала. Такие суточные вариации β могут быть связаны с увеличением поглощения в дневные часы суток и уменьшением соответственно вклада рассеянной компоненты сигнала.

Литература

1. Денисенко П.Ф., Кулешов Г.И., Сказик А.И. Метод оценки рассеянной компоненты ВЧ сигнала при вертикальном зондировании ионосферы. //Геомагнетизм и аэрономия. 2000. Т.40, №5. С.132-135.
2. Томсон Д.Дж. Спектральное оценивание и гармонический анализ. //ТИИЭР 1982. Т.70, №9. С.171-219.
3. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. М.:Мир, 1989.