

МУЛЬТИПЛИКАТИВНАЯ ПОМЕХА ПРИ ПЕЛЕНГАЦИИ ИОНОСФЕРНЫХ СИГНАЛОВ

Кочмарский А.В., Алешенко А.Н., Петров С.В., Бессонов В.А.

Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Калининград, Россия (236041, г. Калининград, ул. А. Невского, 14)

В настоящей работе рассмотрено решение задачи пеленгации ионосферных сигналов в условиях многолучевости методом максимального правдоподобия. Дано обоснование причинам возникновения мультипликативной помехи и оценено ее влияние на оптимальную обработку сигнала. Получены аналитические решения для учета влияния мультипликативной помехи на принятый ионосферный сигнал в условиях многолучевости. Показано, что значение поверхности функционала правдоподобия в минимуме может быть критерием эффективности решения. Критерий позволяет среди совокупности оценок азимутов и углов места многолучевого ионосферного сигнала выбрать наиболее достоверные. Приведены результаты экспериментальных исследований на трассе Москва – Калининград в условиях двухлучевого приема при использовании круговой антенной решетки и одного временного среза данных. Результаты эксперимента хорошо согласуются с теоретическими положениями, изложенными в первой части статьи.

Ключевые слова: пеленгация, метод максимального правдоподобия, мультипликативная помеха.

MULTIPLICATE HINDRANCE AT DIRECTION FINDING OF IONOSPHERIC SIGNALS

Kochmarsky A.V., Aleshchenko A.N., Petrov S.V., Bessonov V.A.

Immanuel Kant Baltic federal university, Kaliningrad, Russia (236041, Kaliningrad, Nevskogo st., 14)

In the real work the solution of a problem of direction finding of ionospheric signals in the conditions of a mnogoluchevost is considered by a method of the maximum credibility. Justification is given to the reasons of emergence of a multiply hindrance and its influence on optimum processing of a signal is estimated. Analytical decisions for the accounting of influence of a multiply hindrance on the accepted ionospheric signal in the conditions of a mnogoluchevost are received. It is shown that value of a surface of a functional of credibility in a minimum can be criterion of efficiency of the decision. The criterion allows among set of estimates of azimuths and corners of a place of a multibeam ionospheric signal to choose the most authentic. Results of pilot studies on the route Moscow-Kaliningrad in the conditions of dual-beam reception when using a circular antenna lattice and one temporary cut of data are given. Results of experiment will well be coordinated with the theoretical provisions stated in the first part of article.

Key words: direction finding, the maximum likelihood method, multiplicative noise.

Введение

Для решения задачи пеленгации ионосферных сигналов часто используются одноточечные пеленгационные устройства с антенными системами типа «Круг», «Угол», «Крест», которые имеют размеры $\sim 100 \div 200$ м. Вследствие малости угловых различий лучей, отраженных от разных областей ионосферы, квазипериод интерференционного распределения напряженности поля на поверхности земли имеет большие значения по сравнению с размерами антенных систем. При таких условиях задача пеленгации ионосферных сигналов не может быть решена с помощью классических методов угловой спектроскопии. В настоящее время разработаны методы с высоким разрешением угловой структуры [1; 2]. Однако в этих методах не учитывается нестационарность параметров ионосферных сигналов. Нестационарность параметров сигнала, пространственная и

временная, приводит к сильной мультипликативной помехе. В результате эффективность методов обработки существенно снижается. Методы, характеризующиеся высокой эффективностью обработки многолучевого ионосферного сигнала [1; 2] при модельных расчетах без учета мультипликативной помехи, теряют свою эффективность при обработке реальных ионосферных сигналов. В связи с этим задача одноточечной пеленгации до настоящего времени не имеет удовлетворительного решения.

В настоящей работе для обработки ионосферных сигналов используется метод максимального правдоподобия [3–5]. Он дает возможность решить задачу оценки параметров многолучевого ионосферного сигнала, однако проблема учета мультипликативной помехи при этом остается. В настоящей работе предлагается использовать значение минимума поверхности функционала правдоподобия в качестве критерия для оценки наличия в сигнале мультипликативной помехи. Чем меньше значение минимума функционала правдоподобия, тем меньше мультипликативная помеха и точнее результат оценки параметров ионосферного сигнала. При этом может быть определен и ранг поля: однолучевое поле или двухлучевое.

Влияние мультипликативной помехи на оптимальную обработку сигналов

Примем в качестве модели при ионосферном распространении радиоволн следующую модель сигнала:

$$\hat{S}(\bar{\lambda}, \bar{R}, t) = \sum_m^M \hat{U}_m(t) \exp(i(\omega_m(\bar{R}, t)t - (\bar{K}_m(\bar{R}, t)\bar{R})), \quad (1)$$

где $\hat{U}_m(\bar{R}, t)$ – амплитуда m -составляющей сигнала, $\omega_m(\bar{R}, t)$ – круговая частота m -составляющей, $\bar{K}_m(\bar{R}, t)$ – волновой вектор m -составляющей ионосферного сигнала являются функциями от времени t и радиус вектора \bar{R} , определяющего точку на поверхности земли;

Временные и пространственные зависимости амплитуды, частоты и волнового вектора отдельных лучей ионосферного сигнала определяют модуляционные изменения, которые в общем случае являются неизвестными. В этом случае логарифм функции правдоподобия [2; 3] может быть записан в следующем виде:

$$\ln(L(\bar{\lambda}, \bar{R}, t)) = -\frac{1}{2\sigma^2 \tau_t \tau_{\bar{R}}} \iint_{t, \bar{R}} \left| \hat{Y}(\bar{R}, t) - \sum_m^M \hat{U}_m(\bar{R}, t) \exp(i(\omega_m(\bar{R}, t)t - (\bar{K}_m(\bar{R}, t)\bar{R})) \right|^2 dt d\bar{R}, \quad (2)$$

где $\bar{\lambda}$ – вектор параметров ионосферного сигнала;

σ^2 – дисперсия аддитивного пространственно-временного шума;

$\tau_t, \tau_{\bar{R}}$ – интервалы корреляции шума во времени и в пространстве вдоль координат x и y .

При такой общей постановке решение основных задач при помощи теории оптимального приёма оказывается сложным. В этих случаях рекомендуется сначала провести статистическое усреднение логарифма функции правдоподобия [4; 5], а затем решить задачу методами теории оптимального приёма. Однако при таком подходе эффективность решения существенно уменьшается. В данной работе нестационарность параметров ионосферного сигнала на интервале обработки будем описывать с помощью мультипликативной помехи. Принятое сообщение при этом будет иметь следующий вид:

$$\hat{Y}(\bar{R}, t) = \sum_m^M \hat{U}_{0m} \exp(i(\omega_{0m}t - (\bar{K}_{0m}\bar{R}))\mu_m(\bar{R}, t) + \hat{U}_{u}(\bar{R}, t), \quad (3)$$

где $\hat{U}_{0m}, \omega_{0m}, \bar{K}_{0m}$ – комплексная стационарная амплитуда, частота и волновой вектор m -составляющей сигнала на интервале обработки;

$$\mu_m(\bar{R}, t) = \frac{\hat{U}_m(\bar{R}, t)}{\hat{U}_{0m}(\bar{R}, t)} \exp(i(\omega_m(\bar{R}, t)t - (\bar{K}_m(\bar{R}, t)\bar{R}) - \omega_{0m}t + (\bar{K}_{0m}\bar{R})) - \text{мультипликативная}$$

помеха;

$\hat{U}_u(\bar{R}, t)$ – шумовая составляющая с дисперсией σ^2 , средним значением, равным нулю, с интервалами корреляции по времени τ_t и по пространству $\tau_{\bar{R}}$. Распределение шумовой составляющей нормальное.

При ионосферном распространении радиоволн мультипликативная помеха является основной. Она определяет дополнительные линии спектра сигнала и значение минимума функционала. В теоретическом плане методов обработки сигналов при наличии мультипликативной помехи в литературе практически нет. Запишем логарифм функции правдоподобия с учетом мультипликативной помехи:

$$\lg(L(\bar{\lambda}', \bar{R}, t) = -\frac{1}{2\sigma^2\tau_t\tau_{\bar{R}}} \int \left| \hat{Y}(\bar{R}, t) - \sum_m^M \hat{U}'_{0m} \exp(i(\omega'_{0m}t - (\bar{K}'_{0m}\bar{R}))f_m(\bar{R}, t) \right|^2 dt d\bar{R}, \quad (4)$$

где $f(\bar{R}, t)$ – известная функция изменения амплитуды с различными параметрами. Она может отличаться от функции в принятом сообщении $\mu_m(\bar{R}, t)$. Штрихами отмечены оценочные параметры сигнала. Усложнение вида функций сигнала в правой части приводит к существенному усложнению решения. Покажем это на примере однолучевого и двулучевого сигнала. При однолучевом сигнале функционал правдоподобия будет иметь вид:

$$\Delta(\omega', \bar{K}', \hat{U}'_0) = \left| \hat{Y}(\bar{R}, t) \right|^2 - \hat{U}'_0 \overline{\hat{Y}(\bar{R}, t) f(\bar{R}, t) \exp(i(\omega't - (\bar{K}'\bar{R}))}. \quad (5)$$

Черта сверху обозначает интегрирование по времени и по поверхности земли. Второе слагаемое определяет функцию корреляции принятого сообщения $\bar{Y}(\bar{R}, t)$ и формы сигнала $f(\bar{R}, t) \exp(i(\omega t - (\bar{K}\bar{R})))$. Если они совпадают, то функционал (5) будет иметь минимальное значение, определяемое дисперсией аддитивного шума σ^2 . Если различия между принятым сообщением и формой сигнала существенные, тогда коэффициент корреляции близок к нулевому значению и функционал (5) практически равен $|\bar{Y}(\bar{R}, t)|^2$.

Таким образом, в зависимости от того, насколько правильно отображает функция $f(\bar{R}, t)$ модуляционные изменения параметров ионосферного сигнала (соответствие функции $\mu(\bar{R}, t)$), значение функционала (5) будет меняться. Следовательно, подбирая функциональную зависимость $f(\bar{R}, t)$ в виде простых функций можно оценивать степень их соответствия реальной модулирующей функции $\mu(\bar{R}, t)$ по значению функционала (5).

Рассмотрим случай приёма двух лучей ионосферного сигнала. Принятое сообщение запишем в виде:

$$\bar{Y}(\bar{R}, t) = \sum_m^M \bar{U}'_{0m} \exp(i(\omega'_{0m} t - (\bar{K}'_{0m} \bar{R}))) \mu_m(\bar{R}, t) + \bar{U}_m(\bar{R}, t), \quad (6)$$

где $M=2$.

В этом случае функционал правдоподобия можно записать в следующем виде:

$$\Delta = |\bar{Y}(\bar{R}, t)|^2 - \bar{U}'_1 \bar{Y}(\bar{R}, t) f_1(\bar{R}, t) \exp(i(\omega'_1 t - (\bar{K}'_1 \bar{R}))) - \bar{U}'_2 \bar{Y}(\bar{R}, t) f_2(\bar{R}, t) \exp(i(\omega'_2 t - (\bar{K}'_2 \bar{R}))). \quad (7)$$

Черта сверху означает интегрирование по поверхности земли и времени. Данный функционал представляет собой поверхность в шестимерном пространстве $\omega'_1, \omega'_2, \bar{K}'_1, \bar{K}'_2$, минимум которой зависит от функций $f_1(\bar{R}, t), f_2(\bar{R}, t)$, от их близости к функциям $\mu_1(\bar{R}, t)$ и $\mu_2(\bar{R}, t)$. Как и в случае однолучевого сигнала, данный функционал зависит от двух функций корреляции между принятым сообщением $\bar{Y}(\bar{R}, t)$ и формами первого и второго сигналов:

$$\bar{R}_1 = \bar{Y}(\bar{R}, t) f_1(\bar{R}, t) \exp(i(\omega'_1 t - (\bar{K}'_1 \bar{R}))), \quad \bar{R}_2 = \bar{Y}(\bar{R}, t) f_2(\bar{R}, t) \exp(i(\omega'_2 t - (\bar{K}'_2 \bar{R}))). \quad (8)$$

Таким образом, значение функционала в зависимости от степени соответствия функций $f_1(\bar{R}, t)$ и $\mu_1(\bar{R}, t)$, а также $f_2(\bar{R}, t)$ и $\mu_2(\bar{R}, t)$ будет меняться в широких пределах. Значение функционала в минимуме является хорошим критерием подбора функций $f_1(\bar{R}, t)$ и $f_2(\bar{R}, t)$ по отношению к неизвестным функциям $\mu_1(\bar{R}, t)$ и $\mu_2(\bar{R}, t)$, которые модулируют составляющие ионосферного сигнала и в принципе неизвестны.

Результаты экспериментов на трассе Москва – Калининград

Для экспериментального подтверждения влияния мультипликативной помехи на эффективность обработки ионосферных сигналов проведен эксперимент на трассе Москва – Калининград. В качестве передающей станции использовалась станция точного времени РВМ, работающая на частоте 9.996 МГц. Ионосферные сигналы принимались с помощью многоканальной антенной системы, состоящей из 8 вибраторов, расположенных по окружности диаметром 115 м. Для обработки использовалась методика однолучевого и двухлучевого приема изложенная в [2].

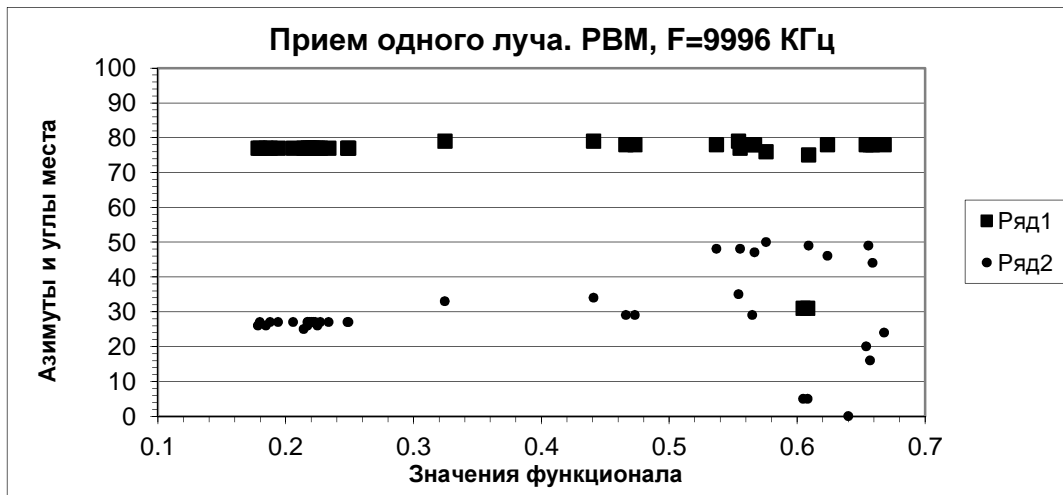


Рис. 1. Прием одного луча. Азимуты (ряд 1) и углы места (ряд 2) в зависимости от значений поверхности функционала в минимуме.

На рис. 1 показаны точками измеренные значения азимутов (ряд 1) и углов места (ряд 2) в зависимости от значения функционала в минимуме. Принимается однолучевой сигнал. При малых значениях функционала решения устойчивые и достоверные. В области больших значений функционала разброс углов места значительно увеличивается.

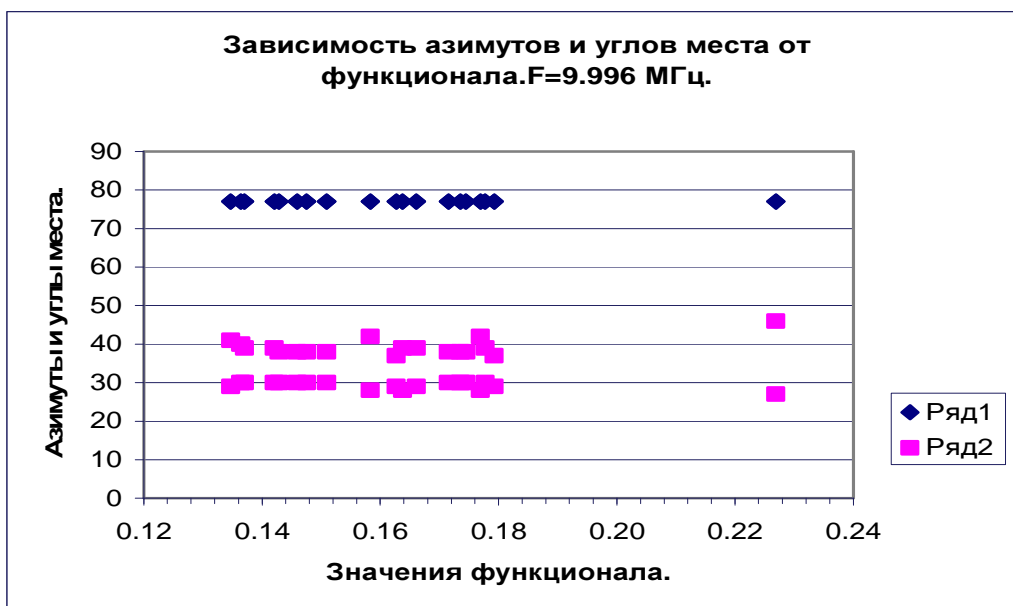


Рис. 2. Два луча. Азимуты (ряд 1) и углы места (ряд 2) в зависимости от значений функционала. Мультипликативная помеха небольшая.

На рис. 2 показан случай малых значений мультипликативной помехи. В результате двухлучевое решение устойчиво и минимум поверхности функционала в измерениях имеет малые значения.

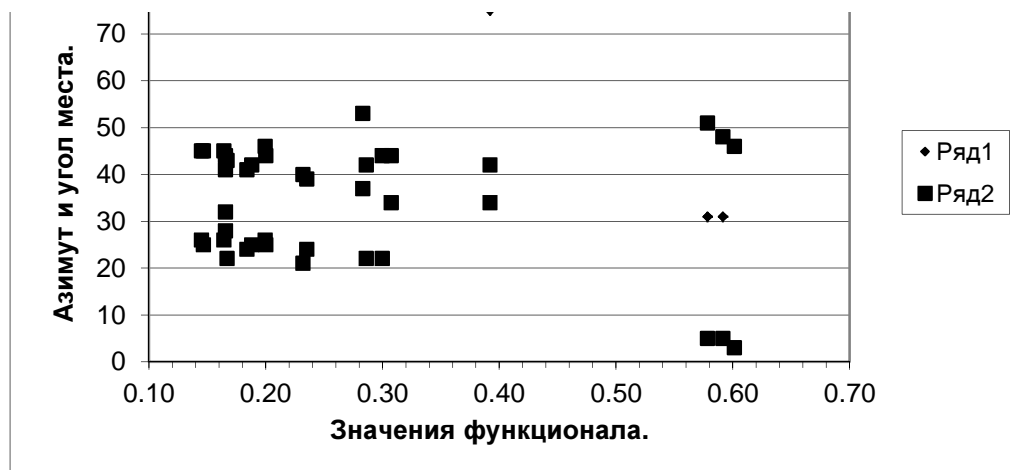


Рис. 3. Азимуты и углы места двухлучевого ионосферного сигнала в зависимости от значений функционала.

На рис. 3 мультипликативная помеха существенная. В результате разброс значений углов места большой, особенно в области больших значений функционала.

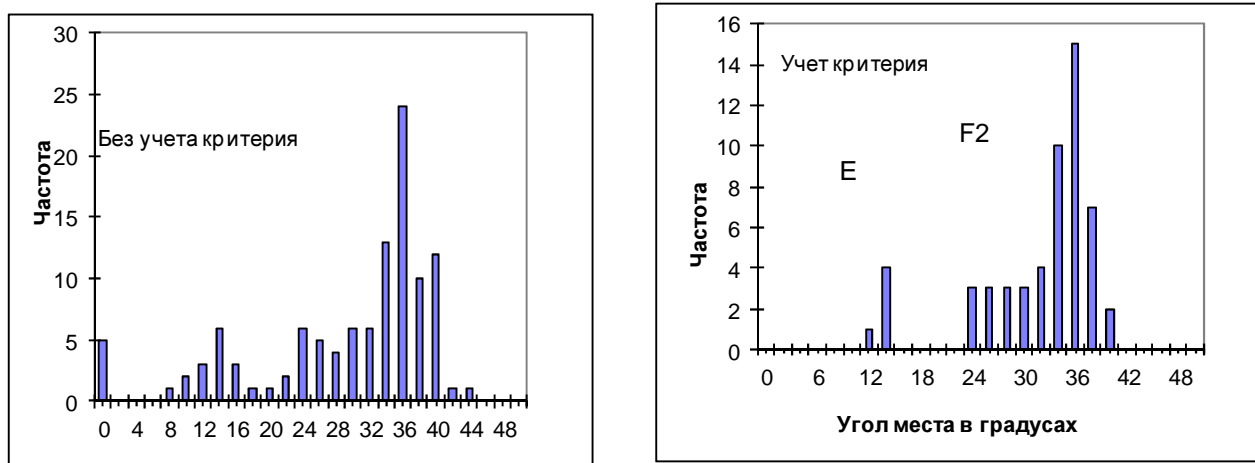


Рис. 4. Гистограмма углов места без учета критерия и с учетом критерия (РВМ г. Москва, июль 90 г., $f=9996$ кГц).

На рис. 4 аналогичное построение сделано для углов места ионосферных сигналов. С учетом критерия исключаются данные, имеющие большие отклонения. Отмечается также более четкое разделение лучей. В области 12° находятся лучи, отраженные от E области ионосферы; в области $24 - 40^{\circ}$ лучи, отраженные от F области ионосферы. Это

предопределяет возможность выделения в массиве данных, полученных при отражении от разных областей ионосферы. Для этого необходимо решить статистическую задачу разделения сигналов, используя гистограмму углов места. При этом могут быть получены новые данные об ионосферных сигналах: средние и дисперсии параметров лучей, а также вероятность отражения от отдельных слоев ионосферы.

Список литературы

1. Книхута Е.В. Развитие методов доплеровской фильтрации ионосферных сигналов : дис. ... канд. физ.-мат. наук / Российский государственный университет им. И. Канта. – Калининград, 2007.
2. Пахотин В.А. [и др.] Методика выделения лучевой и доплеровской структур сигналов // Геомагнетизм и Аэрномия. – 2005. – Т. 45. – № 2. – С. 193-200.
3. Пахотин В.А. [и др.] Теоретические основы оптимальной обработки сигналов. – Калининград : Изд-во РГУ им. И. Канта, 2008. – 189 с.
4. Перов А.И. Статистическая теория радиотехнических систем : учеб. пособ. для вузов. – М. : Радиотехника, 2003. – 400 с.
5. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. – М. : Радио и связь, 1983. – 320 с.

Рецензенты:

Волхонская Елена Вячеславовна, д.т.н., профессор кафедры теоретических основ радиотехники Балтийской государственной академии рыбопромыслового флота, г. Калининград.

Захаров Вениамин Ефимович, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой радиофизики и информационной безопасности Балтийского федерального университета им. И. Канта, г. Калининград.