



УДК 621.391, 621.396, 621.369

В. А. Пахотин, В. В. Мялковский, Ю. А. Пашенко

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОБНАРУЖЕНИЯ СИГНАЛА ПРИ ВЕРТИКАЛЬНОМ ЗОНДИРОВАНИИ ИОНОСФЕРЫ

Рассмотрено решение задачи определения параметров отраженного от ионосферы радиоимпульса. При этом учитывается шумовая составляющая, а также многолучевая структура сигнала, возникающая при формировании двух магнитоионных компонент. Получено выражение для определения вероятности приема радиоимпульса в данных условиях.

In the real work the solution of a problem of determination of parameters of the radio impulse reflected from an ionosphere is considered. The noise component, and also the multibeam structure of a signal arising at formation two magnetoionic component is thus considered. Expression for definition of probability of reception of a radio impulse in these conditions is received.

Ключевые слова: ионосферное зондирование, радиоимпульс, оценка параметров, вероятность обнаружения, магнитоионные компоненты, многолучевой сигнал.

Key words: ionospheric sounding, radio impulse, assessment of parameters, probability of detection, magnetoionic components, multibeam signal.

При излучении коротких радиоимпульсов линейной поляризации (средние широты) в ионосфере формируются две магнитоионные компоненты круговой поляризации. Они распространяются независимо друг от друга с различными скоростями. В результате после отражения от области ионосферы на приемную антенну будут приняты два радиоимпульса с разными временами группового запаздывания. В связи со слоистым строением ионосферы времена группового запаздывания магнитоионных компонент имеют характерные частотные зависимости, которые принято называть ионограммой. Задача обнаружения отраженных от ионосферы радиоимпульсов является актуальной до настоящего времени. Она заключается в том, чтобы автоматически определять пороговое значение, которое оптимальным образом отделяет радиоотражения от ионосферы от шумовых максимумов. Решение задачи обнаружения одиночного радиоимпульса на фоне шума хорошо известно. Вероятность обнаружения определяется функцией ошибок, аргументом которой является отношение энергии сигнала к энергии шума. В случае вертикального зондирования приемник принимает два радиоимпульса (магнитоионные компоненты). В связи с этим необходимо решать эту задачу с учетом двух принятых радиоимпульсов. При этом вероятность обнаружения ионосферного сигнала увеличивается.

Рассмотрим задачу обнаружения импульсного ионосферного сигнала и отраженного от ионосферы. Она, как правило, решается при полностью известных параметрах сигнала. Запишем принятое сообщение в виде



$$\hat{Y}(t) = \hat{U}_1 e^{i\omega(t-t_1)} + \hat{U}_2 e^{i\omega(t-t_2)} + \hat{U}_u(t), \quad (1)$$

где \hat{U}_1, \hat{U}_2 — комплексные амплитуды двух, отраженных от ионосферы сигналов; ω — круговая частота; t_1, t_2 — время приема первого и второго радиоимпульсов соответственно; $\hat{U}_u(t)$ — аддитивный шум с гауссовой плотностью распределения, со средним значением, равным нулю, дисперсией σ^2 и коэффициентом корреляции τ_k .

На основе выражения (1) запишем логарифм функции правдоподобия для двух случаев: при наличии и при отсутствии сигнала:

$$\ln(L_1(\bar{\lambda})) = -\frac{1}{2\sigma^2\tau_k} \int_0^T \left| \hat{Y}(t) - (\hat{U}_1 e^{-i\omega(t-t_1)} + \hat{U}_2 e^{-i\omega(t-t_2)}) \right|^2 dt, \quad (2)$$

$$\ln(L_2(\bar{\lambda})) = -\frac{1}{2\sigma^2\tau_k} \int_0^T \left| \hat{Y}(t) \right|^2 dt$$

Основным неравенством при решении задачи обнаружения сигнала является следующее:

$$\ln(L_1(\bar{\lambda})) \geq \ln(L_2(\bar{\lambda})). \quad (3)$$

При выполнении этого неравенства будем считать, что в принятом сообщении сигнал имеется. Подставив в неравенство (3) выражения (2), получим

$$q = \int_0^T \hat{Y}(t) (\hat{U}_1 e^{-i\omega(t-t_1)} + \hat{U}_2 e^{-i\omega(t-t_2)}) dt \geq \frac{1}{2} \int_0^T \left| \hat{U}_1 e^{-i\omega(t-t_1)} + \hat{U}_2 e^{-i\omega(t-t_2)} \right|^2 dt. \quad (4)$$

Вычисляя интеграл в правой части неравенства, получим

$$q = \int_0^T \hat{Y}(t) (\hat{U}_1 e^{-i\omega(t-t_1)} + \hat{U}_2 e^{-i\omega(t-t_2)}) dt \geq \frac{1}{2} (E_1 + E_2 + 2R\sqrt{E_1 E_2}) = h_0, \quad (5)$$

где $E_1 = |\hat{U}_1|^2 T$; $E_2 = |\hat{U}_2|^2 T$ — энергии первого и второго радиоимпульсов соответственно; $R = \cos(\omega\tau + \Delta\varphi) \left(1 - \frac{|\tau|}{T}\right)$ — коэффициент корреляции двух радиоимпульсов; $\tau = t_1 - t_2$ — различие времен приема радиоимпульсов; $\Delta\varphi$ — разность фаз между радиоимпульсами; h_0 — пороговое значение.

Функция в левой части неравенства (5) задает оптимальный алгоритм обработки. Выражение справа определяет половину суммы энергий двух радиоимпульсов $E/2$, которая равна пороговому значению h_0 . Если параметр $q \geq h_0$, то принимается решение о наличии сигнала в принятой реализации. Если коэффициент корреляции $R = 0$, тогда два радиоимпульса будут ортогональны друг другу, и общая их энергия будет являться суммой энергии радиоимпульсов. Если $R \neq 0$, тогда два радиоимпульса будут неортогональны друг другу (частичное наложение во времени) и суммарная энергия (и пороговое значение) будет зависеть от значения коэффициента корреляции R . Задача обнаружения сигнала в этом случае становится неопределенной. Конечное вы-



ражение, определяющее вероятность обнаружения сигнала при ионосферном зондировании ионосферы, находится следующим образом:

$$P_{\text{обн}} = \Phi\left(\sqrt{\frac{E_{\text{сиг.}}}{E_{\text{ш}}}}\right) = \Phi\left(\sqrt{\frac{E_1 + E_2 + 2R\sqrt{E_1 E_2}}{2\sigma^2 \tau_k}}\right), \quad (6)$$

где $\Phi(x)$ – функция ошибок. Данное решение имеет лишь теоретическое значение. При реальном приеме ионосферного сигнала, состоящего из двух радиоимпульсов, параметры радиоимпульсов неизвестны. В результате пороговое значение определяется по степени исключения шумовой составляющей, т. е. качественно.

60

Рассмотрим методику решения задачи обнаружения сигнала при вертикальном зондировании с оценкой параметров. Пусть принятый сигнал содержит два радиоимпульса, отраженных от ионосферы, с разными временами прихода (1). Запишем логарифм функции правдоподобия при наличии сигнала в принятом сообщении вида (2) с оценочными параметрами (параметры со штрихами)

$$\ln(L_1(\bar{\lambda})) = -\frac{1}{2\sigma^2 \tau_k} \int_0^T \left| \hat{Y}(t) - (\hat{U}'_1 e^{-i\omega(t-t'_1)} + \hat{U}'_2 e^{-i\omega(t-t'_2)}) \right|^2 dt. \quad (7)$$

Дифференцируя выражение (7) по оценочным амплитудам \hat{U}'_1 и \hat{U}'_2 и приравнявая дифференциал к нулю, получим систему уравнений

$$\begin{aligned} \overline{\hat{y}(t)e^{-i\omega(t-t'_1)}} &= \hat{U}'_1 + \hat{U}'_2 e^{i\omega(t'_1-t'_2)} \\ \overline{\hat{y}(t)e^{-i\omega(t-t'_2)}} &= \hat{U}'_1 e^{-i\omega(t'_1-t'_2)} + \hat{U}'_2, \end{aligned} \quad (8)$$

где черта сверху означает интегрирование по t .

Решением системы (8) будет

$$\begin{aligned} \hat{U}'_1 &= \frac{\overline{\hat{y}(t)e^{-i\omega(t-t'_1)}} - \hat{R} \overline{\hat{y}(t)e^{i\omega(t'_1-t'_2)}}}{1 - |\hat{R}|^2}, \\ \hat{U}'_2 &= \frac{\overline{\hat{y}(t)e^{-i\omega(t-t'_2)}} - \hat{R}^* \overline{\hat{y}(t)e^{i\omega(t'_1-t'_2)}}}{1 - |\hat{R}|^2}, \end{aligned} \quad (9)$$

где $\hat{R} = e^{i\omega(t'_1-t'_2) + \varphi'_1 - \varphi'_2} \left(1 - \frac{|\tau|}{T}\right)$ – коэффициент корреляции двух радиоимпульсов; $\tau = t'_1 - t'_2$.

В выражении (9) \hat{U}'_1 и \hat{U}'_2 оцениваются при произвольном значении t'_1 и t'_2 . Если подставить эти выражения в функционал правдоподобия

$$\Delta(t'_1, t'_2) = \int_0^T \left| \hat{Y}(t) - (\hat{U}'_1 e^{-i\omega(t-t'_1)} + \hat{U}'_2 e^{-i\omega(t-t'_2)}) \right|^2 dt, \quad (10)$$

тогда исключается зависимость функционала от \hat{U}'_1 и \hat{U}'_2 . Остается лишь зависимость функционала от t'_1 и t'_2 . Преобразуя выражение (10), можно получить



$$\Delta(t'_1, t'_2) = \left| \overline{\hat{y}(t)} \right|^2 - \hat{U}'_1 \left| \overline{\hat{y}(t) e^{i\omega(t-t'_1)}} \right| - \hat{U}'_2 \left| \overline{\hat{y}(t) e^{i\omega(t-t'_2)}} \right|. \quad (11)$$

Данный функционал является поверхностью в двумерном пространстве t'_1 и t'_2 . Минимум функционала дает возможность оценить все параметры двух радиоимпульсов: амплитуды, начальные фазы, время приема. Это позволяет оценить энергию сигнала E_c :

$$E_c = T \left(\left| \hat{U}'_1 \right|^2 + \left| \hat{U}'_2 \right|^2 + 2U'_1 U'_2 \cos(\omega(t'_1 - t'_2) + (\varphi'_1 - \varphi'_2)(1 - \frac{|t|}{T})) \right). \quad (12)$$

Кроме того, значение функционала в минимуме определяет дисперсию шума σ^2 , а полоса пропускания приемника дает оценку интервала корреляции $\tau_k = \frac{1}{\Delta f}$ и, в свою очередь, энергии шума:

$$E_{ш} = \sigma^2 \tau_k. \quad (13)$$

Согласно выражениям (12) и (13) вероятность обнаружения ионосферного сигнала, содержащего два радиоимпульса, отраженных от ионосферы, будет определена функцией ошибок (6).

Таким образом, задача обнаружения ионосферного сигнала с неизвестными параметрами оказывается решенной. На каждой частоте ионограммы два последовательных радиоимпульса будут характеризоваться вероятностью их обнаружения. Устанавливая пороговое значение вероятности обнаружения на уровне $h_0 = \frac{E_c}{2}$, можно оптимальным образом отделить сигнал от шума по критерию идеального наблюдателя.

В настоящей работе рассмотрено новое решение задачи обнаружения ионосферного сигнала, содержащего два радиоимпульса, отраженные от ионосферы. Вначале оцениваются параметры сигнала, а затем — вероятность обнаружения сигнала, после чего устанавливается пороговое значение.

Список литературы

1. Перов А.И. Статистическая теория радиотехнических систем. М., 2003.
2. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. М., 1983.
3. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. М., 2003.
4. Гусев В.Д., Березин Ю.В., Бирюлин И.В. Пеленгация ионосферных сигналов // Геомагнетизм и аэрномия. 1968. Т. 8, № 6. С. 69–72.

Об авторах

Валерий Анатольевич Пахотин — д-р физ.-мат. наук, проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канга, Калининград.

E-mail: VPakhotin@kantiana.ru

Валентин Васильевич Мялковский — зам. начальника Инновационного дизайн-центра, Научно-исследовательский институт дальней радиосвязи, Москва.

E-mail: idc@niidar.ru



В.А. Пахотин, В.В. Мялковский, Ю.А. Пашенко

Юлия Александровна Пашенко, магистрант, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: pashenko.yuliya@inbox.ru

About authors

Dr Valery Pahotin – prof., I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: VPakhotin@kantiana.ru

Valentin Myalkovsky – deputy head of innovative design center, NIIDAR, Moskov.

E-mail: idc@niidar.ru

Julia Pashenko – graduate, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: pashenko.yuliya@inbox.ru