

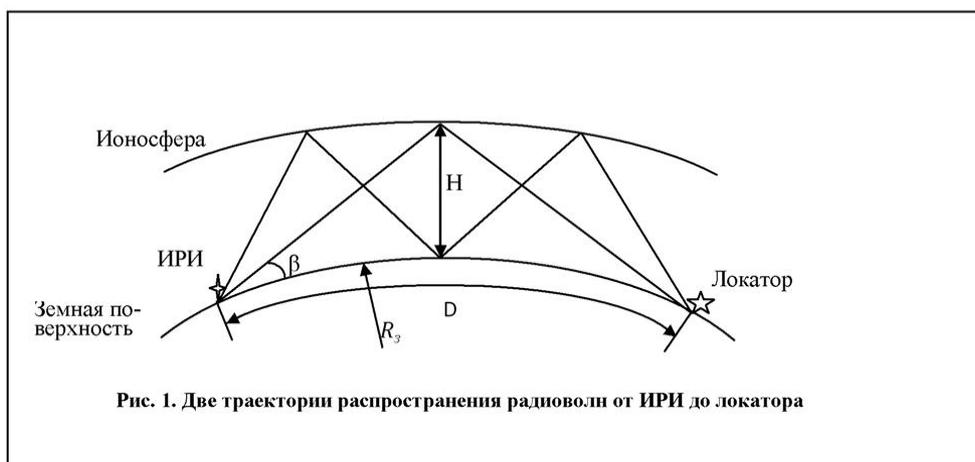
Измерение дальности до источников радиоизлучений КВ диапазона пассивным локатором при многолучевом распространении радиоволн

Дубровин Н. А., ЗАО «Радиус ТН», info@radiytn.ru

В работе приведены методы измерения дальности до источников радиоизлучений (ИРИ) КВ диапазона с помощью пассивного локатора. Представлены результаты определения дальности с помощью расположенного в Москве пассивного локатора до ИРИ, работающих на разных расстояниях (от 400 до 3000 км) и частотах. Исследована многолучевость распространения радиоволн КВ диапазона, позволяющая оценивать дальность до ИРИ.

Введение

Один из методов, известных на сегодняшний день определения дальности заключается в измерении угла места принимаемого сигнала, зная который, с помощью несложных тригонометрических уравнений можно решить поставленную задачу (рис.1).



Высота ионосферы:

$$H = R_3 \sin(\gamma) [tg(\beta + \gamma) - tg(\gamma)] \quad (1)$$

где $\gamma = \frac{D}{2R_3}$; β -угол места принимаемого сигнала; D – расстояние от пассивного локатора до ИРИ; R_3 – радиус Земли.

Как видно из выражения (1) для измерения расстояния до ИРИ необходимо знать высоту ионосферного слоя H в точке отражения волны и угол места β принимаемого сигнала. Как показала проделанная работа, для определения дальности можно дополнительно использовать многолучевость распространяемых радиоволн. На рис. 1 представлен случай, когда принимаемый сигнал имеет две траектории. В работе для определения расстояния до ИРИ использовалась задержка между двумя принимаемыми сигналами. Ее вычисление возможно только при наличии антенн с хорошей чувствительностью и линейным радиоприемным трактом.

Локатор представляет собой расположенные определенным образом приемные антенны. В работе использовалось антенное поле с конфигурацией, показанной на рис. 2. Антенны располагаются на Юго-западе Москвы, в Солнцево. Каждая антенна имеет хорошую чувствительность (не более 0 дБ/мкВ в полосе 1кГц). Особенности и характеристики применяемых антенн описаны в [1].

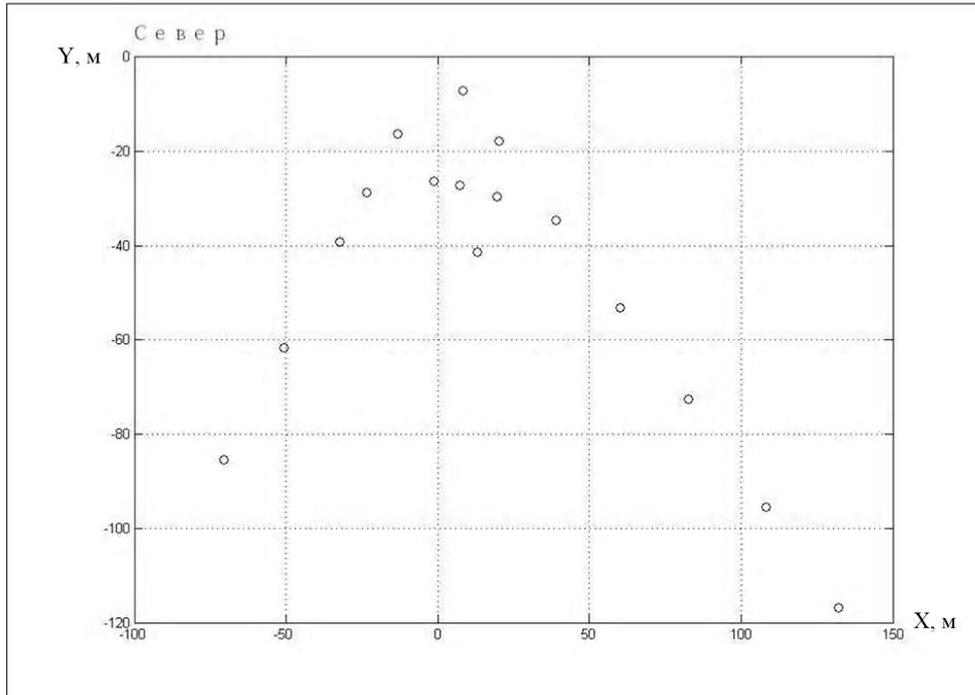


Рис. 2. Расположение антенн

На антенное поле под некоторым азимутальным углом α и углом места β приходит фронт волны, который можно считать плоским. Спектр принятой реализации \tilde{u}_m с частотой f_i на m -ой антенне описывается следующим выражением:

$$\tilde{u}_m(f_i) = \sum_{\lambda=1}^{\Lambda} \tilde{a}_\lambda(f_i) \tilde{e}_{m\lambda}(f_i) + \tilde{\xi}_m(f_i), \quad (2)$$

$$\tilde{a}_\lambda(f_i) = a_\lambda \tilde{s}_\lambda(f_i);$$

$$\tilde{e}_{m\lambda}(f_i) = e^{-j2\pi f_i s_m(\alpha_\lambda, \beta_\lambda)};$$

$$s_m(\alpha_\lambda, \beta_\lambda) = (\mathbf{r}_m - \mathbf{r})^T \mathbf{c}_{\alpha\lambda} / c;$$

$$\mathbf{r}_m = \begin{pmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{pmatrix} \text{ - координаты } m\text{-й антенны};$$

$$\mathbf{r} = \begin{pmatrix} X_1 & \dots & X_M \\ Y_1 & \dots & Y_M \\ Z_1 & \dots & Z_M \end{pmatrix} \text{ - матрица координат антенн};$$

$$\mathbf{c}_{\alpha\lambda} = \begin{pmatrix} \cos(\alpha_\lambda) \cos(\beta_\lambda) \\ \sin(\alpha_\lambda) \cos(\beta_\lambda) \\ \sin(\beta_\lambda) \end{pmatrix};$$

$$\zeta = (\mathbf{r} - \mathbf{rE})^T \mathbf{c}_{\alpha\lambda} / c;$$

$\mathbf{E} = \|1 \dots 1\|$ –единичный вектор-строка размером $1 \times M$;

α_λ -амплитуда сигнала, распространяющегося по траектории λ ;

$\alpha_\lambda, \beta_\lambda$ – азимут и угол места λ -го луча ИРИ;

Λ - количество лучей сигнала;

M -количество антенных элементов;

c -скорость света;

$\tilde{s}_\lambda(f_i)$ - полезный сигнал, $\tilde{\xi}_m(f_i)$ - аддитивный белый гауссовский шум.

Задача заключается в определении направления и дальности прихода сигнала, используя его многолучевое распространение.

Оценка направления принимаемой реализации для одной гармоники и произвольного числа лучей будет определяться из минимума следующей функции [2]:

$$F(\boldsymbol{\psi}) = (\tilde{\mathbf{u}} - \tilde{\mathbf{e}}(\tilde{\mathbf{e}}^H \tilde{\mathbf{e}})^{-1} \tilde{\mathbf{e}}^H \tilde{\mathbf{u}})^H (\tilde{\mathbf{u}} - \tilde{\mathbf{e}}(\tilde{\mathbf{e}}^H \tilde{\mathbf{e}})^{-1} \tilde{\mathbf{e}}^H \tilde{\mathbf{u}}) \quad (3)$$

Знак «H» означает комплексное сопряжение и транспонирование.

$$\boldsymbol{\psi} = \|\boldsymbol{\alpha}^T, \boldsymbol{\beta}^T\|^T, \boldsymbol{\alpha} = \|\alpha_1, \dots, \alpha_\Lambda\|^T, \boldsymbol{\beta} = \|\beta_1, \dots, \beta_\Lambda\|^T$$

$\tilde{\mathbf{u}}$ – вектор-столбец размером $1 \times M$ для сигнала на f_i частоте;

Представленное выше выражение дает возможность оценить азимутальный угол и угол места. Для того чтобы определить дальность до ИРИ необходимо знать еще и высоту ионосферы (см. (1)). Для этого нужно использовать специфику распространения волн КВ диапазона (рис.1). Разность путей одного сигнала относительно другого:

$$\Delta R = 4 \sqrt{\left[H + R_3 \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right) \operatorname{tg}\left(\frac{\gamma}{2}\right) \right]^2 + \left[R_3 \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right) \right]^2} - 2 \sqrt{\left[H + R_3 \sin(\gamma) \operatorname{tg}(\gamma) \right]^2 + \left[R_3 \sin(\hat{\gamma}) \right]^2} \quad (4)$$

При этом разность расстояний сигнала можно определить, измерив задержку Δt .

$$\Delta R = \Delta t \cdot c \quad (5)$$

Автокорреляционная функция в данном случае будет иметь вид:

$$K(\tau) = \int_0^{T_n} u_\Sigma(t) u_\Sigma(t - \tau) dt, \quad (6)$$

где T_n - время наблюдение

$u_\Sigma(t)$ - синфазная сумма сигналов

$$u_\Sigma(t) = \sum_{m=1}^M u_m(t - \zeta_m(\hat{\alpha}, \hat{\beta})) \quad (7)$$

где $\hat{\alpha}$ и $\hat{\beta}$ - измеренные азимутальный угол и угол места.

Решая систему неравенств (1), (4) и (5), определяется дальность до ИРИ.

Для примера в работе рассмотрен записанный сигнал с помощью антенной системы (рис.2), излучаемый из Донецка радиолобителем 20.07.09 в 11:50 по московскому времени на частоте 14.135 МГц. Спектр сигнала изображен на рис.3

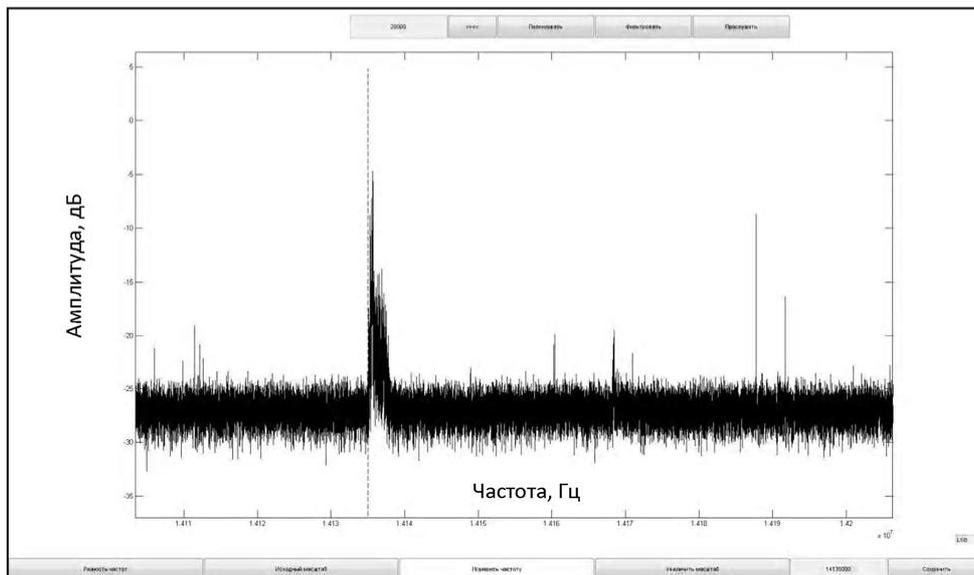


Рис. 3 Спектр принятой реализации

Обратное значение выражения (3) $F_o(\psi) = 1 - F(\psi)$ даст функцию правдоподобия для азимутального угла и угла места. В этом случае оценка будет производиться по максимуму функции.

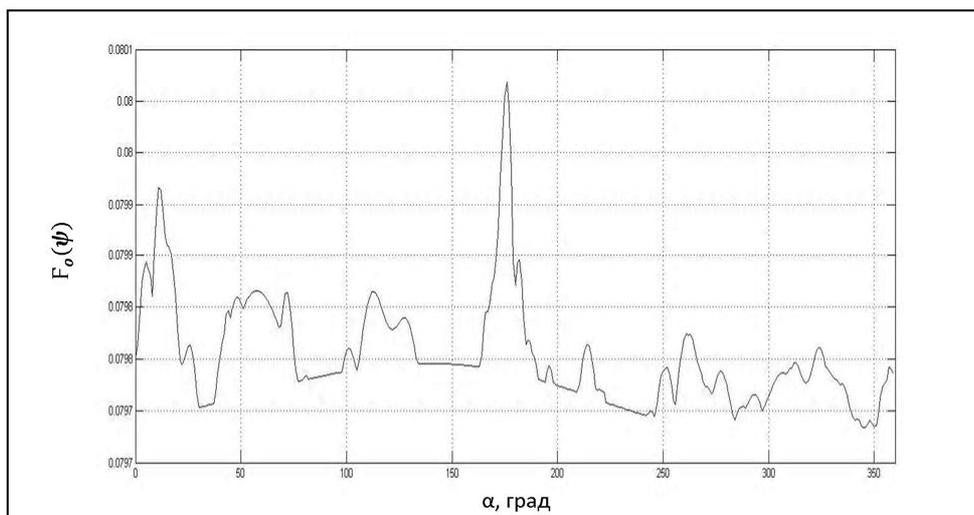


Рис. 4 Функция правдоподобия для азимутального угла

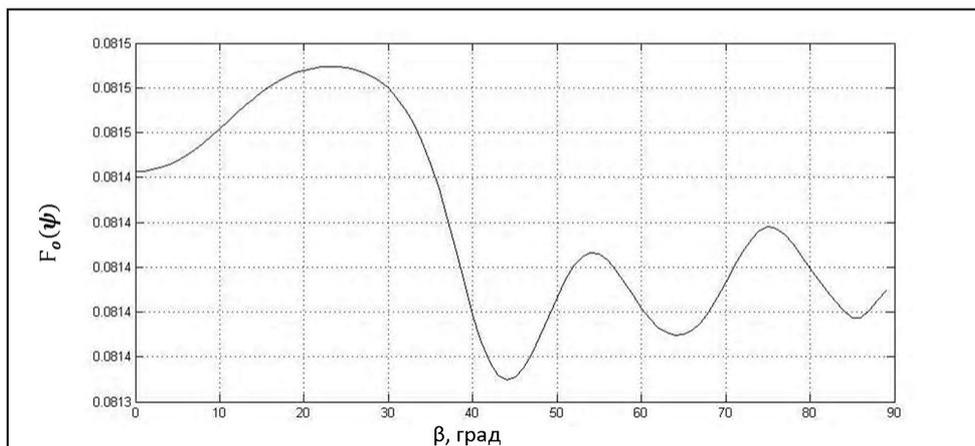


Рис. 5 Функция правдоподобия для угла места

Для оценки задержки $\Delta\tau$ рассмотрим автокорреляционную функцию (6) от синфазно сложенных сигналов со всех антенн (7).

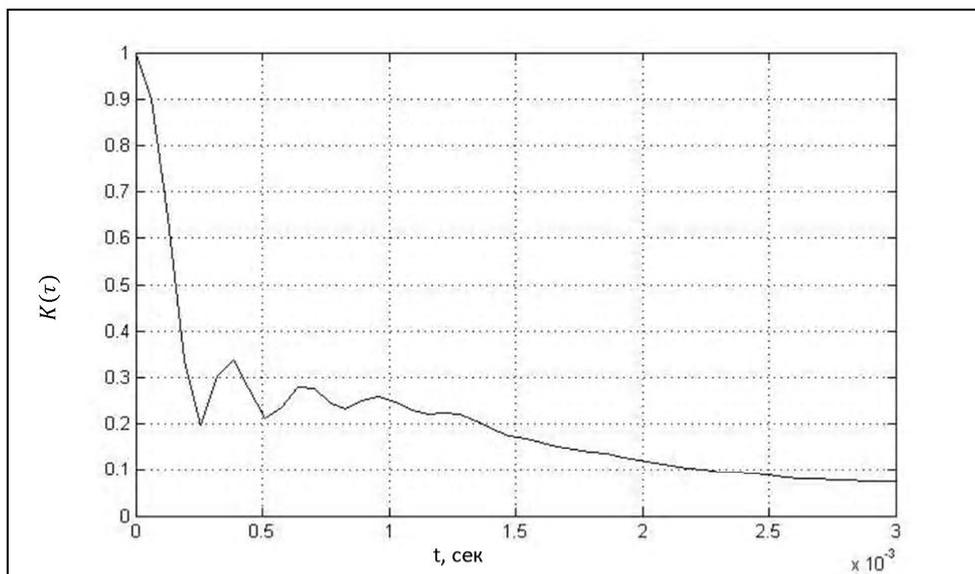


Рис. 6 Автокорреляционная функция синфазно сложенного сигнала

Из рис.6 видно, что корреляционная задержка между двумя сигналами составляет примерно $\Delta\tau = 0,4$ мсек.

Оценив азимутальный угол, угол места и задержку между сигналами (по рис. 4, 5 и 8) можно решить систему неравенств (1), (4) и (5). Для рассматриваемого примера измеренная дальность составляет 840 км, что практически совпадает с реальной (Рис. 7).



Рис. 7 Расположение пассивного локатора и ИРИ на карте

Использование задержки в качестве дополнительной информации дает точность местоопределения пассивным локатором примерно 5% от дальности. Такой результат получен при измерении дальности до ИРИ, работающих в любительском радиодиапазоне. Вычисление задержки между сигналами возможно только при наличии антенн с хорошей чувствительностью и оборудования с высокой линейностью радиоприемного тракта. Возможно определение дальности и без измерения задержки. Такого рода измерения в эксперименте дали оценку расстояния до ИРИ с точностью 20% от дальности. Проведенный эксперимент показал, что оценивание дальности до ИРИ на основании измеренной задержки оказалось более стабильным и предсказуемым по отношению к угломерному методу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дубровин Н.А. Применение высокочувствительных активных антенн в комплексах пеленгования КВ диапазона. – Антенны, 2008, вып. 3(130), с. 21-25.
2. Дубровин А.В. Одноэтапные процедуры и пассивные системы определения координат источников радиоизлучений // Диссертация на соискание ученой степени д.т.н. – М.: МАИ, 2007.
3. Гаврилов К.Ю., Дубровин Н.А. Пеленгация источника некогерентного радиосигнала методом максимального правдоподобия. 9-я Международная конференция и выставка «Цифровая обработка сигналов и ее применение», 28-30 марта 2007, г. Москва, Россия. Выпуск IX-1, с. 232-236.