



УДК 621.391.6
ГРНТИ 47.05.11

МЕТОДИКА МЕСТООПРЕДЕЛЕНИЯ ИСТОЧНИКА РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ СОВМЕСТНОЙ ОЦЕНКЕ АМПЛИТУД И НАПРАВЛЕНИЙ ПРИХОДА СИГНАЛОВ

В.В. ЧЕРНИКОВ

ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

В статье проведен анализ условий ионосферного распространения радиоволн и выявлены основные факторы, влияющие на нарушение электромагнитной доступности источников радиоизлучения для приемников-пеленгаторов триангуляционной системы местоопределения в диапазоне коротких волн. Представлен способ оценки координат излучателей по измерениям амплитуд их сигналов системой программно-управляемых приемников, размещенных в зонах электромагнитной доступности. Получены оценки изменения областей местоположения объектов при совместной оценке амплитуд сигналов в многопозиционной системе приемников-измерителей и направлений их прихода удаленными пеленгаторами.

Ключевые слова: пеленгование, триангуляция, распространение радиоволн, ионосфера Земли, многопозиционная система местоопределения, ортодромия, азимут.

A RADIO EMISSION SOURCE POSITION FINDING TECHNIQUE IN THE JOINT ASSESSMENT OF AMPLITUDES AND SIGNALS ARRIVAL DIRECTIONS

V.V. CHERNIKOV

MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)

The article analyzes the conditions of ionospheric propagation of radio waves and identifies the main factors that affect the violation of the electromagnetic availability of radio sources for receivers-direction finders of the triangulation positioning system in the short-wave range. A method for estimating the coordinates of emitters based on measurements of the amplitude of their signals by a system of software-controlled receivers located in electromagnetic availability zones is presented. Estimates of changes in the areas of objects location were obtained for the joint estimation of signal amplitudes in a multi-position system of receivers-meters and the directions of their arrival by remote direction finders.

Keywords: direction finding, triangulation, radio wave propagation, earth's ionosphere, multiple positioning system, great circle, azimuth.

Ведение. В настоящее время из множества методов определения координат источника радиоизлучения (ИРИ) диапазона коротких волн (КВ) наиболее широкое применение нашел триангуляционный (угломерный) метод. Его реализация требует наличия не менее двух приемников-пеленгаторов, разнесенных на расстояние, определенное в качестве базы пеленгования [1], с точной взаимной временной синхронизацией при электромагнитной доступности объекта пеленгования одновременно для всех постов. Неизменное выполнение этих условий в КВ-диапазоне затруднено ввиду того, что характеристики распространения радиоволн существенно зависят от профиля и электрофизических параметров радиотрасс и подвержены сезонным и суточным флюктуациям концентрации заряженных частиц в слоях ионосферы [2]. Кроме того, точная синхронизация приемников-пеленгаторов с базой пеленгования более 1000 км в большинстве случаев является технически сложной задачей. При



нарушении условий доступности или отсутствии временной синхронизации в системе местоопределения единственным доступным для измерения параметром становится направление на ИРИ с одного пеленгаторного поста, что исключает возможность триангуляционной оценки координат. Для устранения указанного недостатка в [3] разработан способ оценки координат ИРИ на основе измерения амплитуд сигналов многопозиционной системой приемников, расположенных в зоне электромагнитной доступности.

Актуальность. Радиосвязь в КВ-диапазоне пространственной волной возможна вследствие наличия высоко ионизированного слоя атмосферы Земли – ионосфере. Нижняя граница ионосферы располагается примерно на высоте 60 км, с ростом высоты происходит ее расслоение. Образование ионосферы обусловлено Солнечным излучением, которое способствует появлению большого количества свободных заряженных частиц – электронов и ионов. На практике принято различать четыре области ионизации существенные для распространения радиоволн: D, E, F1, F2. Самая нижняя область D находится на высотах 60...90 км и существует только днем. Область E распределяется на высотах 90...120 км. Область F1 образуется только в светлое время суток в летние месяцы и располагается на высотах 120...240 км. Область F2 расположена на высотах 240...400 км. Таким образом, днем существуют все области, а ночью из-за рекомбинации электронов – только слой E и F2. Значения высот указаны ориентировочно, на самом деле высота слоев, концентрация электронов и другие параметры испытывают значительные вариации, как регулярные так и спорадические. Регулярные вариации в D и E области прежде всего определяются уровнем освещенности ионосферы и поэтому суточные и сезонные вариации наиболее значительны. В областях ионосферы D, E и F1 суточный ход изменения электронной концентрации постоянен и повторяется от суток к суткам, тогда как область F2 является неустойчивой и постоянно изменяется по высоте и концентрации электронов. В этой области часто происходят возмущения, которые приводят к резким изменениям ее параметров. Суточный ход электронной концентрации слоя F2 не обладает симметрией относительно полудня, как это наблюдается в слоях E и F1. В годовом ходе электронной концентрации на средних широтах имеются два максимума, меньший из которых наблюдается в феврале, а больший – в октябре. Распределение электронной концентрации также зависит от широты, где влияние на ее распределение вносит магнитное поле Земли. Кроме регулярных слоев, в ионосфере на высоте расположения слоя E периодически образуются неоднородности, представляющие собой скопления достаточно большой площади ионизированного газа с повышенной электронной концентрацией, перемещающиеся под действием существующего в ионосфере ветра. Эти образования получили название спорадических слоев [2, 4, 5].

Для получения актуальных данных о состоянии ионосферы используют методы прямого измерения специальными ракетами вертикального, наклонного, возвратно-наклонного зондирования, просвечивание ионосферы сигналами со спутников. Однако эти методы не могут дать полной информации в режиме реального времени для всей поверхности Земли. Поэтому широкое применение получили ионосферные модели, позволяющие восстановить профиль электронной концентрации в областях, где отсутствуют данные каких-либо измерений. В настоящее время наиболее разработанной и динамично развивающейся является модель IRI [6]. Основными источниками данных, которые используются в данной модели, являются: всемирная сеть ионозондов, спутниковые и ракетные измерения, а также данные радаров некогерентного рассеяния. Модель IRI позволяет вычислять профили электронной концентрации (в диапазоне высот от 50 до 2000 км), полное электронное содержание, температуру электронов, ионов и т.д. в зависимости от времени и координат. Другая модель NeQuick – ионосферная эмпирическая модель, в которой используются данные глобальной сети ионозондов, а также индексы солнечной активности (например, число солнечных пятен). Модель NeQuick позволяет получать профили электронной концентрации в зависимости от времени и географических координат. Сравнительный анализ этих и других моделей представлен в [7].



Таким образом, в процессе распространения коротких волн участвуют все слои ионосферы. При этом области D и E являются поглощающими, а область F2 – отражающей. Электронная концентрация области E недостаточна для отражения коротких волн, поэтому отражение происходит от слоя F2 [4, 5]. Сочетание ионосферных возмущений с вариациями магнитного поля приводит к существенным изменениям характеристик радиоканала в КВ диапазоне и может приводить к нарушению электромагнитной доступности объектов для пеленгаторных постов [8].

Для определения координат ИРИ в [3] предложен метод, основанный на том, что амплитуда сигнала обратно пропорциональна квадрату дальности до ИРИ. Следовательно, для определения его координат необходимо вычислить расстояния до приемных пунктов и найти точку пересечения линий положения, соответствующих измеренным значениям напряженности. Вместе с тем, за счет применения пяти приемников, размещенных по сотовому принципу, при среднеквадратических ошибках выполненных измерений 3...5 дБ достижимая точность местоопределения не превышает 10 % от радиуса контролируемого района.

В качестве измерителей амплитуды можно использовать пространственно распределенную систему программно-управляемых приемников [9], расположенных в электромагнитной доступности к ИРИ. Такие приемники в настоящее время получили активное развитие благодаря внедрению новых технологий в вычислительную технику. Программно-управляемые приемники представляют собой диапазонные устройства со сверхширокополосными антеннами, аналого-цифровыми преобразователями (АЦП), программируемыми логическими интегральными схемами (ПЛИС) и каналами передачи данных USB или Ethernet. Их программное обеспечение позволяет осуществлять многопользовательское управление трансиверами и ресиверами с помощью удаленных компьютеров, подключенных к глобальной информационно-телекоммуникационной сети.

Особенность архитектуры программно-управляемых приемников заключается в отсутствии преобразований сигналов, связанных с переносом по частоте, что устраняет побочные каналы приема [10]. В приемнике выполняется мгновенное преобразование аналогового сигнала в цифровую форму. При этом верхняя граница спектра сигнала определяется вычислительными ресурсами микросхемы АЦП. При использовании современных микросхем АЦП реализуется обработка сигналов с шириной полосы до 1 ГГц.

Используемые в приемниках высокоскоростные микросхемы ПЛИС реализуют функции цифровых понижающих конвертеров. Они производят выборки спектров сигналов необходимой полосы и передают их на вычислительные процессоры для обработки. В результате формируются цифровые потоки меньшей интенсивности. Из общего цифрового потока можно выделить необходимое число потоков, создав тем самым одновременно несколько каналов приема, т.е. реализовав несколько «виртуальных приемников» в диапазоне рабочих частот [11].

Визуальное обнаружение сигнала происходит по результатам анализа его спектра. При расчете спектра сигнала, как правило, выбирается 4096 или 8192 точки, в зависимости от требуемой детальности анализа и разрешения монитора, возрастающих при увеличении детальности воспроизведения структуры сигнала. Вследствие малого отношения числа точек к числу отсчетов, поступающих с АЦП (30...60 млн.), для отображения панорамы спектра сигнала в микросхеме ПЛИС выполняется деление его полосы на блоки, число которых равно необходимому числу пикселей экрана. По максимальному значению сигнала в блоке формируется поток данных для программы отображения спектра [9]. Для оценки уровня приема подходит стандартный инструмент из состава программного обеспечения программно-управляемого приемника – S-метр. S-метр представляет собой измеритель силы принимаемого радиосигнала в условных баллах шкалы S. На конференции Международного союза радилюбителей, были установлены следующие стандарты калибровки S-метра: изменение силы сигнала на один балл шкалы S соответствует его изменению на 6 дБ; на частотах до



Из рисунка 1 следует, что площадь S_{ABCD} можно вычислить как разность площадей сегментов S_{ABQ} и S_{CDQ} окружности. Согласно теореме синусов [12] для треугольников SOB и SOC справедливы соотношения

$$\frac{OB}{\sin \delta} = \frac{R}{\sin \beta}, \quad (1)$$

$$\frac{OC}{\sin \phi} = \frac{R}{\sin \gamma}. \quad (2)$$

Из (1) и (2) следует

$$\beta = \arcsin\left(\frac{R \cdot \sin \delta}{OB}\right), \quad \gamma = \arcsin\left(\frac{R \cdot \sin \phi}{OC}\right), \quad (3)$$

где $OB = OC = r$ – радиус окружности, R – расстояние между центром окружности O и пеленгаторным постом, углы δ и ϕ вычисляются с использованием следующих выражений:

$$\delta = (\theta - \alpha) - \frac{\rho}{2}, \quad \phi = (\theta - \alpha) + \frac{\rho}{2}, \quad (4)$$

где θ – пеленг на ИРИ.

Расчет азимута α и расстояния R по ортодромии между двумя точками с географическими координатами (φ_1, λ_1) и (φ_2, λ_2) на земной поверхности осуществляется решением обратной геодезической задачи на сфере [13].

Из теоремы косинусов [12] следует, что

$$\cos \sigma = \sin \varphi_1 \cdot \sin \varphi_2 + \cos \varphi_1 \cdot \cos \varphi_2 \cdot \cos \omega, \quad (5)$$

где $\omega = \lambda_2 - \lambda_1$.

Тогда, $s = a \cdot \sigma$, при отрицательном $\cos \sigma$ $s = a \cdot (\pi - |\sigma|)$, где a – радиус Земли (6378 км).

Применяя теорему котангенсов, найдем прямой азимут α :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\cos \varphi_2 \cdot \sin \omega}{\cos \varphi_1 \cdot \sin \varphi_2 - \sin \varphi_1 \cdot \cos \varphi_2 \cdot \cos \omega}. \quad (6)$$

Так как сумма углов любого плоского треугольника равна 180° , рассчитаем углы AOB и DOC

$$AOB = 180 - 2 \cdot \beta, \quad DOC = 180 - 2 \cdot \gamma. \quad (7)$$

Таким образом,

$$S_{ABQ} = \frac{1}{2} (AOB - \sin(AOB)) \cdot r^2; \quad S_{CDQ} = \frac{1}{2} (DOC - \sin(DOC)) \cdot r^2. \quad (8)$$

В выражении 8 углы AOB и DOC исчисляются в радианах. Вычислив площади сегментов ABQ и CDQ , получим искомую площадь

$$S_{ABCD} = S_{ABQ} - S_{CDQ}. \quad (9)$$



Область вероятного местоположения ИРИ, определенная системой измерителей амплитуд сигналов, характеризуется площадью окружности $S_{окр}$ радиуса r . Поэтому, используя выражения

$$k = \frac{S_{окр}}{S_{ABCD}}, \quad (10)$$

$$K = 100 \cdot \left(1 - \frac{1}{k}\right) \quad (11)$$

определим изменение области вероятного местоположения ИРИ при совместной оценке амплитуды и направления прихода сигнала.

Будем полагать, что область вероятного местоположения ИРИ, найденная амплитудным методом, ограничена окружностью радиусом $r = 300$ км с центром в г. Тюмень (57.16 с.ш., 65.5 в.д.). Пеленгаторный пост, расположенный в г. Воронеж (51.67 с.ш., 39.22 в.д.), определил пеленг на ИРИ, равный 65° . Найдем азимут α и расстояние R между центром окружности и пеленгаторным постом. Из (5) и (6) получим $R = 1795.34$ км, $\alpha = 59.87^\circ$. Подставив R в (3), получим углы β и γ , равные соответственно 25.5° и 39.5° , тогда угол AOB равен 129° , угол $DOC - 101^\circ$. Используя (8), получим площади сегментов ABQ и CDQ , которые составят соответственно 66261.13 км² и 35104.12 км², а площадь S_{ABCD} будет равна 31157 км². Площадь окружности $S_{окр} = 2\pi r = 282600$ км. Из (10) следует, что площадь S_{ABCD} в $k = 9.07$ раз меньше $S_{окр}$, что согласно (11), соответствует сокращению области вероятного расположения ИРИ на 89 % по сравнению с первоначальной.

Вывод. На основании проведенного анализа ионосферного распространения радиоволн выявлено, что в условиях отсутствия электромагнитной доступности ИРИ для реализации угломерных методов местоопределения, измерение координат можно проводить путем оценки уровня сигнала. Погрешность такого местоопределения затрудняет пространственную селекцию компактно расположенных ИРИ. Для повышения точности определения координат можно использовать методику совместной оценки амплитуды и направления прихода сигнала.

Проведенные расчеты показали, что в зависимости от степени совпадения направления прихода сигнала к удаленному пеленгаторному посту с областью вероятного местоположения ИРИ точность определения местоположения ИРИ возрастает на 65...90 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кондратьев В.С., Котов А.В., Марков Л.Н. Многопозиционные радиотехнические системы / под ред. В.В. Цветнова. М.: Радио и связь, 1986. 264 с.
2. Неганов В.А., Осипов О.В., Раевский С.Б., Яровой Г.П. Электродинамика и распространение радиоволн / под ред. В.А. Неганова и Г.П. Ярового. М.: Радиотехника, 2007. 744 с.
3. Уфаев В.А., Афанасьев В.И., Разиньков С.Н. Оценка координат источника радиоизлучения на основе измерений амплитуды электромагнитного поля // Радиотехника, 2003. № 10. С. 71–73.
4. Дружинин Г.И. Антенны и распространение радиоволн. Часть II. Распространение радиоволн. Учебное пособие. Петропавловск-Камчатский: КГТУ, 2003. 56 с.
5. Родос Л.Я. Электродинамика и распространение радиоволн / под ред. Л.Я. Родос. СПб.: Издательство СЗТУ, 2007. 90 с.
6. International Reference Ionosphere 2016 // [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://omniweb.gsfc.nasa.gov> (дата обращения 12.02.2020).



7. Андреева Е.С., Локота М.В. Параметры ионосферы: данные системы FormoSat-3/COSMIC, ионозондов и моделей IRI, NeQuick // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 1. С. 75–84.
8. Разиньков С.Н., Решетняк Е.А. Экспериментальная оценка эксплуатационной точности триангуляционной системы местоопределения источников излучения КВ-диапазона // Антенны, 2016. № 6 (229). С. 45–49.
9. Разиньков С.Н., Черников В.В. XVI Международная научно-техническая конференция «Физика и технические приложения волновых процессов». Самара: ПГУТИ. С. 42–44.
10. Радиоприемные устройства / под ред. А.Г. Зюко. М.: Связь, 1975. 368 с.
11. DDC-radio: торжество технологий // [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.radioexpert.ru> (дата обращения 10.02.2020).
12. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике. М.: Наука, 1980. 976 с.
13. Жаров В.Е. Сферическая астрономия. Фрязино: Век, 2006. 480 с.

REFERENCES

1. Kondrat'ev V.S., Kotov A.V., Markov L.N. Mnogopozicionnye radiotekhnicheskie sistemy / pod red. V.V. Cvetnova. M.: Radio i svyaz', 1986. 264 p.
2. Neganov V.A., Osipov O.V., Raevskij S.B., Yarovoj G.P. `Elektrodinamika i rasprostranenie radiovoln / pod red. V.A. Neganova i G.P. Yarovogo. M.: Radiotekhnika, 2007. 744 p.
3. Ufaev V.A., Afanas'ev V.I., Razin'kov S.N. Ocenka koordinat istochnika radioizlucheniya na osnove izmerenij amplitudy `elektromagnitnogo polya // Radiotekhnika, 2003. № 10. pp. 71–73.
4. Druzhinin G.I. Antenny i rasprostranenie radiovoln. Chast' II. Rasprostranenie radiovoln. Uchebnoe posobie. Petropavlovsk-Kamchatskij: KGTU, 2003. 56 p.
5. Rodos L.Ya. `Elektrodinamika i rasprostranenie radiovoln / pod red. L.Ya. Rodos. SPb.: Izdatel'stvo SZTU, 2007. 90 p.
6. International Reference Ionosphere 2016 // [`Elektronnyj resurs] Rezhim dostupa: <http://omniweb.gsfc.nasa.gov> (data obrascheniya 12.02.2020).
7. Andreeva E.S., Lokota M.V. Parametry ionosfery: dannye sistemy FormoSat-3/COSMIC, ionozondov i modelej IRI, NeQuick // Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2014. Т. 11. № 1. pp. 75–84.
8. Razin'kov S.N., Reshetnyak E.A. `Eksperimental'naya ocenka `ekspluatacionnoj tochnosti triangulyacionnoj sistemy mestoopredeleniya istochnikov izlucheniya KV-diapazona // Antenny, 2016. № 6 (229). pp. 45–49.
9. Razin'kov S.N., Chernikov V.V. XVI Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferenciya «Fizika i tehnicheckie prilozheniya volnovykh processov». Samara: PGUTI. pp. 42–44.
10. Radiopriemnye ustrojstva / pod red. A.G. Zyuko. M.: Svyaz', 1975. 368 p.
11. DDC-radio: torzhestvo tehnologij // [`Elektronnyj resurs] Rezhim dostupa: <http://www.radioexpert.ru> (data obrascheniya 10.02.2020).
12. Bronshtejn I.N., Semendyaev K.A. Spravochnik po matematike. M.: Nauka, 1980. 976 p.
13. Zharov V.E. Sfericheskaya astronomiya. Fryazino: Vek, 2006. 480 p.

© Черников В.В., 2020

Черников Валерий Викторович, адъюнкт, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А.