

ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ИСТОЧНИКА РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ПЕЛЕНГОВАНИИ ЕГО СИГНАЛА, ОТРАЖЕННОГО ОТ ИОНОСФЕРЫ, ОДНИМ РАДИОПЕЛЕНГАТОРОМ

Калугин В. В., Кочергин А. Г., Чеботов А. В.

ООО "Научно-технический центр радиотехнических систем АН ПРЭ"

61001, г. Харьков, пл. Восстания 7/8, тел. (057) 732-25-53,

E-mail: nterts@ic.kharkov.ua; факс (057) 732-68-63

The analysis of the difficulties limiting the wide application of a method of coordinates definition for a source of a radio emission in the process of the direction finding of its signal, reflected from an ionosphere, by one direction finder (SSL-method) has been carried out. The method of calculation of radio-waves paths and the model of the ionosphere, which provide comprehensible speed and accuracy of calculations, have been suggested. The experimental checkout on a real direction finder with real signals has proved the proposed decisions.

Введение

В ранний период становления радиопеленгации была отмечена возможность определения координат источника радиоизлучения (ИРИ) при пеленговании его сигнала, отраженного от ионосферы, одним радиопеленгатором. Для осуществления этой цели необходимо измерить не только азимут принимаемого сигнала, но и его угол возвышения (угол места). Тогда, считая, в простейшем случае, траекторию распространения сигнала треугольной, и зная высоту точки отражения сигнала, можно однозначно определить его координаты из простых геометрических соображений.

Применение этого метода, получившего название SSL (Single Side Location) ограничивалось следующими объективными трудностями:

1) отсутствием эффективных методов одновременного определения пеленга и угла возвышения радиосигнала при недостаточно развитых мощностях вычислительных средств;

2) отсутствием достаточно представительных методов расчета траекторий радиоволн в ионосфере, т. к. треугольное представление траектории далеко от истины;

3) отсутствием адекватных моделей ионосферы и методов прогнозирования ее параметров, влияющих на траекторию распространения радиоволн.

Первое ограничение было снято с широким внедрением большебазисных пеленгаторных антенных систем и использованием методов цифровой обработки сигналов [1] наряду с появлением высокопроизводительных сигнальных процессоров.

Второе и третье ограничения в значительной степени сняты существенным прогрессом в области теории и практики распространения радиоволн. Применение приближенных методов волновой теории, с одной стороны, и численных методов, с другой, позволило значительно продвинуться в этой области, снизив требования к ресурсам вычислительных средств. Особенно успешно развивались методы решения задач, основанные на лучевом (геометрооптическом) приближении [2]. Прогресс в области создания моделей ионосферы во многом обусловлен проводимыми широкомасштабными ее исследованиями. Все это обусловило продолжение исследований эффективности применения метода SSL.

Цель исследования. Целью настоящего исследования является:

- выбор метода расчета траекторий радиоволн в ионосфере;
- выбор модели распределения концентрации электронов ионосфере;
- экспериментальная проверка эффективности принятых решений.

Выбор метода расчета траекторий радиоволн и выбор модели ионосферы

В [2] показано, что небольшое изменение в общепринятой параболической модели высотного распределения электронной концентрации в ионосфере позволяет получить точные выражения для параметров траектории луча, исключая необходимость решения системы дифференциальных уравнений. Такое приближение высотного распределения электронной концентрации названо квазипараболическим. При этом угловое расстояние

от точки приема до точки отражения, измеренное вдоль поверхности Земли, на основании закона Снеллиуса, выражается интегралом, который является табличным, поэтому использования численных методов для его вычисления не требуется.

Анализ этого интеграла показывает, что для вычисления дальности распространения необходимо знание частоты сигнала ИРИ, его пеленга и угла возвышения, определяемых пеленгатором, и параметров ионосферы в точке отражения:

- высоты основания отражающего слоя;
- полутолщины слоя;
- критической частоты.

Эти параметры позволяет получить Международная справочная модель ионосферы IRI-2006 [3] (сокр. от англ. International Reference Ionosphere) - международный проект, спонсируемый комитетом космических исследований (COSPAR) и Международным союзом URSI. Для определения искомым параметров ионосферы эта модель требует задания следующих исходных данных:

- координат проекции точки отражения радиоволны на земную поверхность;
- местного времени в точке отражения;
- астрономической даты;
- индекса солнечной активности (числа Вольфа). Как вариант может использоваться индекс, прогнозируемый самой моделью.

Координаты проекции точки отражения радиоволны на земную поверхность могут быть определены с помощью итерационного метода следующим образом:

- выбирается начальное приближение углового расстояния D от точки приема до точки отражения и, используя известные координаты пеленгаторного пункта φ, λ и измеренный пеленг Θ , по формулам сферической тригонометрии определяется начальное приближение координат точки отражения;

- по формуле, полученной после взятия интегралов, определяется следующее приближение дальности от точки приема до точки отражения, используя полученное приближение координат точки отражения, и вновь по формулам сферической тригонометрии определяется начальное приближение координат точки отражения;

- процесс повторяется до тех пор, пока приращение углового расстояния не станет пренебрежимо малым, после чего координаты ИРИ определяются по формулам сферической тригонометрии с подстановкой вместо углового расстояния D его удвоенной величины, что соответствует угловому расстоянию всей траектории распространения.

Использование итерационного процесса обусловлено тем, что координаты точки отражения, определяющие параметры ионосферы, заранее неизвестны. В связи с этим необходимо многократное обращение к модели, требующее существенных вычислительных затрат, что приводит к необходимости поиска путей более быстрого определения параметров ионосферы, пусть даже за счет некоторого ухудшения точности результатов. Одним из таких способов является табулирование временных и широтных зависимостей параметров ионосферы.

В [4] приведены экспериментальные графики зависимостей критической частоты слоя F2 от величины зенитного угла Солнца. Эти графики для каждого месяца были аппроксимированы полиномами пятой степени, которые в дальнейшем используются для вычисления критической частоты в зависимости от зенитного угла Солнца и индекса солнечной активности.

В качестве временных и широтных зависимостей высоты основания слоя F2 ионосферы и его полутолщины использованы таблицы данных, полученных коллективом ИЗМИРАН в ходе Международного геофизического года. Для получения данных между узлами таблицы использована двумерная квадратичная интерполяция по времени и по широте и одномерная интерполяция по индексу солнечной активности и по астрономической дате.

На рис. 1 приведен пример расчета семейства траекторий распространения для различных углов возвышения в соответствии с приведенной методикой.

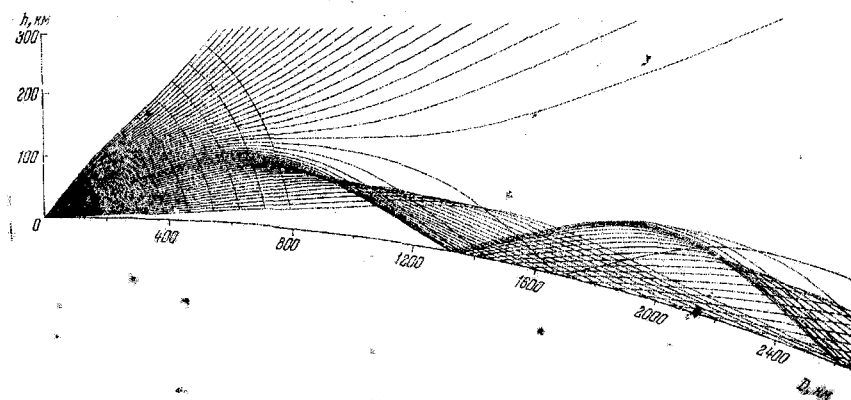


Рис. 1. Пример расчета семейства траекторий распространения

Использование лучевого приближения для расчета траектории распространения радиосигнала в квазипараболической ионосфере и построение модели ионосферы с использованием данных ИЗМИРАН привело к существенному сокращению временных вычислительных затрат. На основе этой модели реализована программа местоопределения по методу SSL, работающая в составе программного обеспечения радиопеленгатора ВЧ-диапазона в реальном масштабе времени. Результаты местоопределения представляются графически на фоне географической карты в виде проекции траектории распространения на земную поверхность (локсодромии) и эллипса вероятности, характеризующего погрешность местоопределения.

Экспериментальная проверка эффективности найденных решений

С целью экспериментальной проверки эффективности решений был проведен натурный эксперимент, в ходе которого производилось пеленгование (определение пеленга и угла места) девятнадцати ИРИ, работавших в диапазоне частот от 5 до 8 МГц и расположенных на различных направлениях в вероятной зоне первого скачка на расстояниях от 444 до 1009 км, и одного ИРИ, расположенного в зоне крутопадающих волн на расстоянии 30 км.

Пеленгование производилось в дневное время на разработанном в ООО «НТЦ РТС АН ПРЭ» (далее НТЦ) радиопеленгаторе ВЧ-диапазона с большебазисной кольцевой антенной решеткой [5].

При этом кроме регистрации пеленга и угла места, в режиме реального времени производился расчет траектории распространения радиосигнала и вычисление координат ИРИ. Всего было проведено 30 сеансов пеленгования. При вычислении координат использовались две модели ионосферы: модель IRI и модель НТЦ с использованием данных ИЗМИРАН, описанная выше. При этом, для определения параметров ионосферы в модели НТЦ использовалось значение числа Вольфа, равное 40, которое получено из Internet (www.izmiran.ru и www.spaceweather.com) на дату проведения эксперимента.

Траектории распространения радиоволн рассчитывались с учетом отражения от слоя F2 методом лучевого приближения при квазипараболическом распределении концентрации электронов в ионосфере. По результатам вычисления координат ИРИ как с использованием модели IRI, так и с использованием модели НТЦ, построены гистограммы распределения радиальных ошибок (ошибок определения дальности до ИРИ), приведенные на рис. 2.

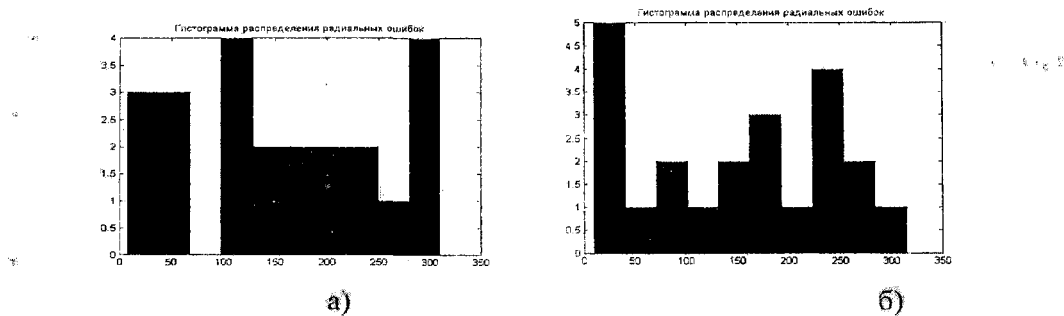


Рис. 2. Распределение радиальных ошибок: а) по методике IRI; б) по методике НТЦ

При этом математическое ожидание радиальной ошибки по отношению к средней длине трассы для методики IRI составило 16%, а для методики НТЦ – 14%. Эти результаты свидетельствуют о том, что математические ожидания радиальных ошибок местоопределения несущественно разнятся при использовании двух моделей и хорошо согласуются с данными, приведенными в литературных источниках.

В ходе эксперимента исследована также зависимость математического ожидания относительной радиальной ошибки местоопределения от числа Вольфа, используемого в расчетах. Из этой зависимости следует, что при изменении числа Вольфа в пределах от 40 до 120 математическое ожидание относительной ошибки изменяется в небольших пределах - от 14,4% до 16,1% и, следовательно, требования к точности задания числа Вольфа невысоки.

Выводы

1. Математические ожидания радиальных ошибок местоопределения несущественно разнятся при использовании двух рассмотренных моделей (14% и 16%) и хорошо согласуются с данными, приведенными в литературных источниках.

2. Требования к точности задания индекса солнечной активности (числа Вольфа) невысоки, так как его изменение в широких пределах несущественно влияет на точность местоопределения.

3. Использование модели ионосферы НТЦ с использованием данных ИЗМИРАН дает существенное сокращение временных вычислительных затрат, что позволяет реализовать программное обеспечение радиопеленгатора ВЧ-диапазона, работающее в реальном масштабе времени.

4. Для дальнейшего повышения точности местоопределения следует приложить первоочередные усилия к практической реализации методов пространственного спектрального оценивания с высоким разрешением и к изысканию способов селекции мод распространения.

Литература

1. Калугин В. В., Чеботов А. В., Кочергин А. Г., Большебазисный радиопеленгатор ВЧ-диапазона с цифровой обработкой сигналов // Прикладная радиоэлектроника, 2002, Том 1, №1.

2. Croft T. A., Hoogasian H., Точные расчеты параметров траектории луча в квазипараболической ионосфере без учета магнитного поля // Radio Sci. 3 (New Series), №1, p. 69-74 (1968).

3. Bilitz D., International Reference Ionosphere 2000 // Radio Science, 36, 2, 2001

4. Корсунский Л. Н., Распространение радиоволн при связи с искусственными спутниками Земли. М., изд-во «Советское радио», 1971.

5. Калугин В.В., Кочергин А. Г., Чеботов А. В., Основные принципы построения современных большебазисных радиопеленгаторов для работы в условиях априорной неопределенности в ВЧ и ОВЧ диапазонах // Прикладная радиоэлектроника, 2006, Том 5, №3.