

Экспериментальная оценка точности местоопределения источников радиоизлучения диапазона высоких частот угломерным и угломерно-дальномерным методами

С.Н. Разиньков, Е.А. Решетняк

ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»
394064, Российская Федерация, г. Воронеж
ул. Старых Большевиков, 54а

Проведена экспериментальная оценка точности местоопределения источников радиоизлучения диапазона высоких частот угломерным и угломерно-дальномерным методами. Исследованы закономерности среднеквадратических ошибок измерения координат радиостанций метеоинформации аэродромных сетей, стандартных частот и времени, передатчиков телекодовых и непрерывных сообщений в различное время года и суток.

Ключевые слова: угломерный и угломерно-дальномерный методы, азимутально-угломестный пеленгатор, среднеквадратическая ошибка местоопределения источника радиоизлучения.

Для пространственной селекции и распознавания источников радиоизлучения (ИРИ) в процессе мониторинга обстановки важное значение имеет задача оценки их местоположения. На основе координатной информации, инвариантной к контрастности демаскирующих признаков в различные моменты времени, может проводиться анализ динамических состояний объектов при смене режимов работы, реализации мер маскировки и снижения заметности [1].

В диапазоне высоких частот (ВЧ), где структура и параметры сигналов, распространяющихся в радиоканалах, могут существенным образом изменяться за счет рефракции в ионизированных слоях атмосферы [2–4], местоопределение излучателей, как правило, выполняется угломерным и угломерно-дальномерным методами [5].

Первый из указанных методов базируется на фиксации направлений прихода сигналов в пространственно разнесенных позициях и нахождении местоположения ИРИ по координатам точек пересечения пеленгов; реализация второго метода включает в себя однопунктное пеленгование, построение с использованием данных о высоте ионизированных слоев атмосферы лучевых траекторий сигналов и определение дальности до излучателей [5].

В предлагаемой работе по результатам испытаний двухпозиционной системы азимутально-угломестных пеленгаторов [6] в период с июня по

декабрь 2015 г. исследованы среднеквадратические ошибки (СКО) угломерной оценки координат радиостанций метеоинформации аэродромных сетей Российской Федерации и ближнего зарубежья, стандартных частот и времени [7], передатчиков телекодовых и непрерывных сообщений. С применением одиночного пеленгаторного поста и станции вертикального зондирования ионосферы в тождественных условиях найдены показатели точности местоопределения этих объектов угломерно-дальномерным методом.

Цель работы – анализ закономерностей СКО оценки местоположения излучателей ВЧ-диапазона.

В пеленгаторных постах использовались активные антенные решетки из 16 вибраторов высотой 2,5 м, расположенные на площади размером 200 × 200 м, и синхронизированные когерентные радиоприемные устройства с преобразованием частоты. За счет предварительной калибровки антенно-фидерного тракта при настройке на частоту пеленгуемого сигнала фазовая неидентичность каналов приемника не превышала 3°, амплитудная неидентичность – 2% [6].

В летний период пеленгаторы разворачивались в Центральном и Северо-Западном федеральных округах на удалении 1000 км; в осенне-зимний период измерения проводились при размещении пеленгаторных постов в Центральном и Южном федеральных округах с базой 500 км. Геометри-

ческие факторы угломерных систем, выбираемые из условия достижения наименьшей СКО оценок координат излучателей [5], характеризовались максимальным значением угла прихода сигналов в азимутальной плоскости 30° и удалением их источников от центра базы пеленгования от 200 км до 6500 км. При однопунктном местоопределении расстояние между пеленгаторным постом и ИРИ изменялось в пределах от 450 км до 6600 км.

Длительность пеленгуемых телекодовых сообщений не превышала 2 минут, время передачи непрерывных сигналов с амплитудной модуляцией на фиксированных частотах – 1 часа. Выходная мощность радиостанций изменялась в пределах от 1 до 50 кВт. Измерения проводились в режиме доплеровского разделения лучей [6; 8], из обработки исключались результаты, полученные в периоды естественных возмущений ионосферы [2]. Координаты объекта оценивались по максимальному значению плотности распределения при отношении сигнал-шум на входах пеленгаторов не менее 18 дБ в серии из 10–12 измерений на каждой частоте. Погрешность местоопределения ИРИ вычислялась как математическое ожидание квадрата отклонения результатов измерений от полученной оценки координат в степени 0,5 [9].

В табл. 1 приведены СКО местоопределения радиостанций метеоинформации аэродромных сетей угломерным методом в летний период. Селекция сигналов на совпадающих частотах осуществлялась в соответствии с временным регламентом работы радиостанций [6].

Из анализа результатов следует, что точность выполняемых измерений существенно зависит от частоты обрабатываемых сигналов и геометрического фактора угломерной системы. Погрешность оценки местоположения радиостанции, развернутой в районе г. Самары, на частоте 6693 кГц более чем в 1,7 раза превышает значение, достижимое на частоте 8888 кГц. Показатели точности определения координат радиостанции вблизи г. Новосибирска на указанных частотах различаются в 1,35 раза. При различии удалений от центра базы угломерной системы до 12,5 % СКО местоопределения ИРИ в районе г. Тюмени на частоте 8888 кГц превосходит значение, полученное для радиостанции, размещенной вблизи г. Екатеринбург, в 4,9 раза вследствие смещения направления прихода сигнала в азимутальной плоскости к максимально допустимому значению [9]. При поступлении сигналов под близкими по значениям углами, не превышающими 30° , СКО местоопределения объектов, как показано в [5], возрастает пропорционально отношению дальности до них во второй степени к базе угломерной системы.

Также установлено, что СКО оценки координат радиостанции вблизи г. Новосибирска при работе в дневное время на частоте 11318 кГц не превышает 9,4 % от дальности. Погрешность местоопределения радиостанции, размещенной в районе г. Ташкента, в дневное время на частоте 11279 кГц составляет 22,4 % от дальности, а в ночное время на частоте 3407 кГц – 18,7 % от дальности. Согласно табл. 1, эти показатели

Таблица 1

Точность местоопределения радиостанций метеоинформации аэродромных сетей угломерным методом в летний период

Местоположение ИРИ	Удаление ИРИ от центра базы угломерной системы, км	Частота излучаемого сигнала, кГц	СКО местоопределения ИРИ (% от дальности)
Таллинн	700	4645	4,7
Ростов-на-Дону	1000	6617 8939	6,3 7,6
Самара	1000	6693 8888	4,8 2,8
Сыктывкар	1100	8888	5,6
Екатеринбург	1600	8888	7,9
Тюмень	1800	8888	14,3
Новосибирск	2900	6693 8888	17,2 12,7
Ташкент	3000	8819	10,5

превосходят СКО местоопределения радиостанций на частоте 8819 кГц в 2,13 и 1,78 раза соответственно.

В табл. 2 приведены СКО оценок координат радиостанций метеоинформации аэродромных сетей в летний период угломерно-дальномерным методом.

Согласно табл. 2, точность оценки координат объектов составляет (8,5–21,6) % от дальности. Значительная СКО местоопределения ИРИ в районе г. Новосибирска обусловлена погрешностями построения лучевых траекторий сигналов вследствие флуктуаций плотности электронов [4] и пространственного распределения ионизированных слоев атмосферы. При этом, как показано в [6], на трассах протяженностью около 1000 км вариации направлений прихода сигналов по углу места при 3 отражениях от ионосферы достигают 15...20°, а в плоскости азимута – до 4...5°.

В табл. 3 приведены погрешности угломерного местоопределения радиостанций стандартных частот и времени в различное время суток летнего периода.

Существенные СКО местоопределения обусловлены незначительным удалением ИРИ, при котором углы прихода сигналов к пеленгаторам малы, и геометрический фактор угломерной системы, обратно пропорциональный их значениям [5], даже в направлении нормали к базе пеленгования достаточно велик.

При выбранных позициях пеленгаторных постов достоверная оценка координат радиостанций стандартных частот и времени, размещенных в районах гг. Иркутск, Новосибирск, Таллинн, затруднена ввиду нестабильности их работы [7] и уровней сигналов, превышающих спектральную плотность мощности шумов приемных каналов пеленгаторов менее чем на 18 дБ.

В табл. 4 приведены СКО оценки координат радиостанций стандартных частот и времени угломерно-дальномерным методом в дневное и ночное время летнего периода.

Полученные результаты подтверждают выводы [6] о снижении погрешности определения позиций ИРИ по мере повышения частоты принимаемых сигналов. Из сопоставления данных табл. 4 и [6] следует, что СКО местоопределе-

Таблица 2

Точность местоопределения радиостанций метеоинформации аэродромных сетей угломерно-дальномерным методом в летний период

Местоположение ИРИ	Удаление ИРИ от пеленгаторного поста, км	Частота излучаемого сигнала, кГц	СКО местоопределения ИРИ (% от дальности)
Таллинн	1300	4645	9,5
Ростов-на-Дону	500	6617 8939	10,2 8,5
Самара	800	6693 8888	7,6 8,9
Сыктывкар	1300	8888	11,9
Екатеринбург	1500	8888	12,3
Тюмень	1800	8888	16,5
Новосибирск	2900	6693 8888	21,6 13,7
Ташкент	2500	8819	15,7

Таблица 3

Точность местоопределения радиостанций стандартных частот и времени угломерным методом в летний период (день/ночь)

Местоположение ИРИ	Удаление ИРИ от центра базы угломерной системы, км	Частота излучаемого сигнала, кГц	СКО местоопределения ИРИ (% от дальности)
Москва	200	<u>14996</u> 4996	<u>51,7</u> 65,0

Таблица 4

Точность местоопределения радиостанций стандартных частот и времени угломерно-дальномерным методом в летний период (день/ночь)

Местоположение ИРИ	Удаление ИРИ от пеленгаторного поста, км	Частота излучаемого сигнала, кГц	СКО местоопределения ИРИ (% от дальности)
Москва	500	$\frac{14996}{4996}$	$\frac{11,5}{15,9}$

Таблица 5

Точность местоопределения передатчиков телекодowych и непрерывных сообщений угломерным методом в летний период

Местоположение ИРИ	Удаление ИРИ от центра базы угломерной системы, км	Частота излучаемого сигнала, кГц	Время работы ИРИ (мск)	СКО местоопределения ИРИ (% от дальности)
Калининградская область	1000	1500–4500	20.00–03.00	24,5
		4500–18000	10.00–03.00	2,9
		18000–30000	10.00–19.00	2,4
Свердловская область	1500	1500–4500	20.00–03.00	37,2
		4500–18000	10.00–19.00	3,3
		18000–30000	11.00–20.00	2,2
Новосибирская область	3000	1500–4500	21.00–23.00	14,5
		4500–18000	21.00–23.00	5,3
		18000–30000	10.00–12.00	4,6
Республика Бурятия	4700	1500–4500	20.00–03.00	14,2
		4500–18000	10.00–03.00	5,2
		18000–30000	10.00–19.00	4,6
Хабаровский край	6500	1500–4500	10.00–19.00	*
		4500–18000		6,7
		18000–30000		–

Таблица 6

Точность местоопределения передатчиков телекодowych и непрерывных сообщений угломерным методом в осенне-зимний период

Местоположение ИРИ	Удаление ИРИ от центра базы угломерной системы, км	Частота излучаемого сигнала, кГц	Время работы ИРИ (мск)	СКО местоопределения ИРИ (% от дальности)
Саратовская область	500	1500–4500	20.00–03.00	12,7
		4500–18000	10.00–03.00	5,5
		18000–30000	10.00–19.00	4,2
Пензенская область	600	1500–4500	10.00–03.00	–
		4500–18000		2,8
		18000–30000		*
Самарская область	800	1500–4500	10.00–19.00	–
		4500–18000		3,8
		18000–30000		*
Оренбургская область	1400	1500–4500	10.00–19.00	*
		4500–18000		4,3
		18000–30000		*
Свердловская область	1700	1500–4500	10.00–03.00	*
		4500–18000		7,5
		18000–30000		*

ния излучателей ВЧ-диапазона в летний период возрастают относительно показателей, достижимых для тех же трасс в осенне-зимний период, на 12...25 %. Данное явление обусловлено рефракцией сигналов на спорадическом Es-слое ионосферы, прогноз характеристик которого является кратковременным и, как правило, имеет низкую точность [3; 4; 6].

В табл. 5 и 6 приведены СКО угломерной системы при оценке координат передатчиков телекодированных и непрерывных сообщений в летний и осенне-зимний периоды соответственно. Поддиапазон частот (1500–4500) кГц используется при организации радиосвязи на дистанциях свыше 2000 км в осенне-зимний период и ночное время. В поддиапазоне частот 4500–18000 кГц функционируют сети международной, государственной и ведомственной стационарной и подвижной радиосвязи; поддиапазон частот 18000–30000 кГц предназначен для работы сетей радиовещания, производственно-диспетчерских радиотрасс, средств магистральной и зоновой связи общего и специального назначения [2].

Прочерк в столбце, содержащем СКО оценок координат, соответствует результатам местоопределения ИРИ с аномальными ошибками за счет обработки сигналов на фоне пространственно-коррелированных помех, создаваемых удаленными источниками. Символ «*» означает, что условия распространения сигналов в поддиапазоне частот [2–4] не позволяют осуществлять их прием в точках размещения пеленгаторов в соответствующий период времени.

Анализ табл. 5 и 6 показывает, что в ночные часы СКО местоопределения объектов возрастают. Данный факт может быть обусловлен усилением интерференционных эффектов сигналов при суточных изменениях электрофизических параметров подстилающей поверхности на трассах распространения и флуктуаций электрической неоднородности ионизированных слоев атмосферы [6; 9].

В поддиапазоне частот 1500–4500 кГц действующие высоты пеленгаторных антенн достаточно малы [2], а приемники в целях защиты от промышленных помех и атмосферных радиопомех обладают низкой чувствительностью [6; 8; 9]. Вследствие энергетических потерь принимаемых сигналов местоопределение передатчиков в системе с базой пеленгования 1000 км на дальности от 1000 км до 1500 км выполняется с СКО, превышающей погрешность, характер-

ную для поддиапазона частот 18000–30000 кГц, в 10,2–16,2 раза, а на дальности 3000–4700 км – более чем в 3,1 раза.

В угломерной системе с базой 500 км СКО оценки координат радиопередатчиков на расстоянии до 500 км в поддиапазонах частот 1500–4500 кГц и 4500–18000 кГц различаются в 2,3 раза; в поддиапазоне частот 18000–30000 кГц погрешность местоопределения ИРИ возрастает в 1,55 раза относительно показателей, полученных в средней части ВЧ-диапазона.

В табл. 7 приведены СКО оценки координат передатчиков телекодированных и непрерывных сообщений угломерно-дальномерным методом в летний период, а в табл. 8 – в осенне-зимний период.

Установлено, что погрешность местоопределения объектов в поддиапазоне частот 1500–4500 кГц с летний период лежит в пределах (22,9–53,2) % от дальности, а в осенне-зимний период снижается до 16,2 %. Минимальная нормированная СКО оценки координат ИРИ в поддиапазоне частот 4500–18000 кГц на удалении 6600 км составляет 5,7 % от дальности. Наибольшая для летнего периода погрешность определения местоположения излучателей в поддиапазоне частот 18000–30000 кГц (17,6 % от дальности) в осенне-зимний период снижается в 1,68 раз.

Из табл. 2, 4, 7 и 8 следует, что усредненная по частоте, времени проведения измерений, дальности и направлению трассы СКО местоопределения ИРИ составляет (11–13) %.

Таким образом, по результатам испытаний двухпозиционной системы азимутально-угломерных пеленгаторов исследованы СКО угломерной оценки координат передатчиков сигналов ВЧ-диапазона; с применением одиночного пеленгаторного поста и станции вертикального зондирования ионосферы найдены показатели точности местоопределения этих объектов угломерно-дальномерным методом. Выявлены зависимости погрешностей выполняемых измерений от частоты, протяженности и направления трассы распространения сигналов в различное время года и суток.

Показано, что в нижней части диапазона точность местоопределения ИРИ угломерной системой составляет единицы процентов от дальности (минимальное значение 4,7 %); по мере роста частоты этот показатель увеличивается не менее чем в 1,2 раза. Оценка координат ИРИ угломерно-дальномерным методом может быть выполнена с СКО (11–13) % от дальности. Возмож-

Таблица 7

Точность местоопределения передатчиков телекодowych и непрерывных сообщений угломерно-дальномерным методом в летний период

Местоположение ИРИ	Удаление ИРИ от пеленгаторного поста, км	Частота излучаемого сигнала, кГц	Время работы ИРИ (мск)	СКО местоопределения ИРИ (% от дальности)
Калининградская Область	1300	1500–4500 4500–18000 18000–30000	20.00–03.00 10.00–03.00 10.00–19.00	34,5 11,4 8,1
Свердловская Область	1500	1500–4500 4500–18000 18000–30000	20.00–03.00 10.00–19.00 11.00–20.00	53,2 12,6 9,9
Новосибирская Область	3000	1500–4500 4500–18000 18000–30000	21.00–23.00 21.00–23.00 10.00–12.00	22,9 13,7 12,4
Республика Бурятия	4600	1500–4500 4500–18000 18000–30000	20.00–03.00 10.00–03.00 10.00–19.00	37,3 14,9 17,6
Хабаровский край	6600	1500–4500 4500–18000 18000–30000	10.00–19.00	* 15,9 *

Таблица 8

Точность местоопределения передатчиков телекодowych и непрерывных сообщений угломерно-дальномерным методом в осенне-зимний период

Местоположение ИРИ	Удаление ИРИ от пеленгаторного поста, км	Частота излучаемого сигнала, кГц	Время работы ИРИ (мск)	СКО местоопределения ИРИ (% от дальности)
Саратовская область	500	1500–4500 4500–18000 18000–30000	20.00–03.00 10.00–03.00 10.00–19.00	16,2 11,4 10,5
Пензенская область	450	1500–4500 4500–18000 18000–30000	10.00–03.00	– 15,8 *
Самарская область	750	1500–4500 4500–18000 18000–30000	10.00–19.00	– 11,3 *
Оренбургская область	1200	1500–4500 4500–18000 18000–30000	10.00–19.00	* 9,7 *
Свердловская область	1500	1500–4500 4500–18000 18000–30000	10.00–03.00	* 9,5 *

ности повышения ее точности ограничены погрешностями прогноза лучевых траекторий [4] и аномальными ошибками измерений направлений прихода сигналов [6; 9] при флуктуациях электрофизических параметров и пространственного распределения ионосферы.

Список литературы

1. Радзиевский В.Г., Сирота А.А. Теоретические основы радиоэлектронной разведки. М.: Радиотехника, 2004. 432 с.

2. Головин О.В., Простов С.П. Системы и устройства коротковолновой радиосвязи / под ред. О.В. Головина. М.: Горячая линия-Телеком, 2006. 598 с.

3. Использование радиодиагностики ионосферы в задаче пеленгации источников декаметрового излучения / П.Ф. Денисенко [и др.] // Электромагнитные волны и электронные системы, 2006. Т. 11. № 5. С. 24–27.

4. Агарышев А.И. Прогнозирование характеристик дальнего распространения радиоволн в неоднородной ионосфере. Дисс. ... д-ра физ.-мат. наук. Иркутск: Иркутский госуниверситет, 2000. 357 с.

5. Кондратьев В.С., Котов А.В., Марков Л.Н. Многопозиционные радиотехнические системы / под ред. В.В. Цветнова. М.: Радио и связь, 1986. 264 с.
6. Ветроградов Г.Г., Чайка Е.Г. Оценка точности однопозиционного местоопределения на среднеширотных трассах при различных способах задания состояния ионосферы // Сборник трудов XXII Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». Воронеж: Изд-во Воронежского государственного университета, 2016. Т. 2. С. 734–745.
7. www.radioscanner.ru. Дата обращения 21.01.2014 г.
8. Васин А.А. Пеленгаторные антенные решетки коротковолнового диапазона с высокоточным способом пеленгования. Дисс. ... канд. техн. наук. М: МАИ (НИУ), 2012. 146 с.
9. Разиньков С.Н., Решетняк Е.А. Экспериментальная оценка эксплуатационной точности триангуляционной системы местоопределения источников излучения КВ-диапазона // Антенны. 2016. № 5 (229). С. 50–54.

The experimental assessment of accuracy of measurement of coordinates of radio-radiation of range of high frequencies by goniometric and goniometric and range-metering methods

S.N. Razinrkov, Ye.A. Reshetnyak

The experimental assessment of accuracy of measurement of coordinates of radio-radiation of range of high frequencies goniometric and goniometric and range-metering is carried out by methods. Regularities of mean squared measurement errors of coordinates of radio stations of meteo-information of airfield networks, standard frequencies and time, transmitters of telecode and continuous messages in different season and are probed days.

Keywords: goniometric and goniometric and range-metering methods, azimuth and meridian direction finder, squared measurement error of measurement of coordinates of radio-radiation.

Неганов, В.А.

Физическая регуляризация некорректных задач электродинамики: линии передачи, антенны, дифракция электромагнитных волн / В.А. Неганов. – М.: САЙНС-ПРЕСС, 2008. – 432 с., 122 ил.



ISBN 978-5-88070-161-2

УДК 537.87

ББК 32.84

Н 41

Изложены основы физической регуляризации некорректных задач электродинамики, связанной с особенностями физических и математических моделей задач (физические допущения, некорректные математические выкладки, отсутствие предельного перехода). Подход, по мнению автора, обладает большими возможностями, чем метод регуляризации Тихонова А.Н. интегральных уравнений Фредгольма первого рода, названный в книге методом математической регуляризации. Метод физической регуляризации (МФР) применен к анализу волноведущих и излучающих структур, а также задачам дифракции электромагнитных волн на некоторых телах. МФР позволил впервые корректно осуществить анализ полей в ближних зонах некоторых антенн, устранить несамосогласованное приближение Кирхгофа в задачах дифракции, установить связь поверхностной плотности тока проводимости с напряженностями электрического и магнитного полей для диполя Герца и т. п.

Для специалистов в области радиотехники и радиофизики СВЧ, электромагнитной совместимости РТС, математической теории дифракции и математического моделирования электродинамических структур самого широкого назначения. Может быть полезна преподавателям вузов, докторантам, аспирантам и студентам старших курсов соответствующих специальностей.