

## МОДЕЛЬ СИГНАЛА, ОТРАЖЕННОГО ОТ АВРОРАЛЬНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ СЛОЯ E, ДЛЯ НАДГОРИЗОНТНОЙ РЛС ДАЛЬНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ УКВ ДИАПАЗОНА

И.В. Тютин, В.Б. Оводенко, С.А. Пушай

ОАО НПК НИИДАР, г. Москва, Россия,  
e-mail: tyutin@physics.msu.ru

### Аннотация

В работе представлено описание модели сигнала, отраженного от авроральных неоднородностей слоя E в приемнике РЛС дальнего обнаружения (ДО). На основе параметров РЛС и рассчитываемых ракурсных углов и геомагнитных условий производится оценка энергетических характеристик помехи: отношения помеха-шум (ОПШ) и эффективной поверхности рассеяния (ЭПР). Особенностью модели является учет пространственного распределения отражающих областей полярной ионосферы, боковых лепестков диаграммы направленности антенны на излучение и прием, боковых лепестков функции неопределенности (ФН) зондирующего сигнала. Результаты моделирования показали, что при определенных условиях боковые лепестки диаграммы направленности (ДН) и боковые лепестки ФН вносят заметный вклад (до нескольких дБ) в суммарный отраженный сигнал.

### Введение

РЛС УКВ диапазона периодически регистрируют "отражения" из северного квадранта. Исследования, проведенные, например в [1, 2], показали, что "отражения" - это анизотропное рассеяние радиоволн от ионосферных неоднородностей. Рассеянный сигнал приходит с дальностей 500 – 1000 км. За когерентное рассеяние ответственны плазменные неустойчивости (Фарлей-Бунимановские и дрейфовые неустойчивости [1]) E и F слоев ионосферы, формирующие неоднородности концентрации электронов, вытянутые вдоль силовых линий магнитного поля. Продольный размер таких неоднородностей в 10-30 раз больше их поперечного размера, который имеет масштаб от сантиметров до километров [2]. По этой причине рассеянный сигнал когерентен вдоль силовой линии магнитного поля в пределах 5-15 длин волн радара [3]. Из-за вытянутости неоднородностей вдоль силовых линий интенсивность рассеяния максимальна при ракурсном угле близком к 0 (перпендикулярность луча радара и линии магнитного поля). Ракурсным называют наименьший угол, образованный нормалью вектора геомагнитного поля и вектором "луча" радара. Локусом – изолинии ракурсного угла. Поэтому такое обратное рассеяние радиоволн от ионосферных неоднородностей называю ракурсным рассеянием радиоволн (PPP), а факт существования большого числа таких неоднородностей в ионосфере - радиоавророй (термин, определенный на 14 сессии Генеральной Ассамблеи МАГА). PPP часто встречается в авроральной ионосфере в слое E (высоты возникновения от 90 км до 120 км, [4]). Наиболее вероятное время обнаружение рассеянного сигнала с 20 до 8 часов LT (местного времени) [5].

### Модель сигнала помехи в приемном тракте РЛС

Рассмотрим модель формирования сигнала в приемнике РЛС. Зондирующий импульс формируется передающей антенной решеткой РЛС. При прохождении импульса через E слой ионосферы на высотах 110 - 120 км происходит ракурсное рассеяние зондирующей волны. Отражения от этих неоднородностей регистрируются приемной антенной решеткой РЛС. Далее в оптимальном фильтре происходит накопление и когерентное сложение регистрируемых сигналов в течение времени накопления. Энергетические характеристики результирующего сигнала, отраженного от помехи и цели после такого суммирования, являются результатом расчета представляемой модели. В таком виде сигнал поступает в приемный тракт РЛС.

В модели используется фасеточное представление пространства, «освещаемого» радиоволной от передающей антенной решетки РЛС. Таким образом, слой с ионосферными неоднородностями в фасеточном представлении имеет вид набора ячеек с выбранным размером и содержащим ряд параметров: координаты фасета, импульсный объем, ракурсный угол. Предполагается, что внутри фасеты перечисленные параметры не меняются. Размер фасеты задается наклонной дальностью, углом места и азимутом  $(\Delta R; \Delta \varepsilon; \Delta \beta)$  в местной сферической системе координат, связанной с географическими направлениями в точке стояния РЛС (МССКГ). Значение  $\Delta R$  определяется исходя из разрешающей способности современных РЛС по дальности. Значение  $\Delta \varepsilon$  выбирается исходя из разрешающей способности РЛС по углу места и ширины главного и первых боковых лепестков диаграммы

направленности антенны (ДНА) на прием и передачу. Азимутальный размер фасеты обусловлен шириной ДНА. Вектор геомагнитного поля, для расчета ракурсного угла, рассчитывался по модели IGRF.

Возможность регистрации помехи определяет отношение помеха-шум (ОПШ). Для оценки данной энергетической характеристики помехи от отдельной фасеты, содержащей помеху, воспользуемся основным уравнением радиолокации в следующем виде:

$$CNR_{\varepsilon, \beta, R} = \frac{\Pi_0 \sigma R_0^3 c T}{2R^4} F_{изл}(\varepsilon, \beta) F_{пр}(\varepsilon, \beta) \chi(R), \quad (1)$$

$$\sigma = \eta V$$

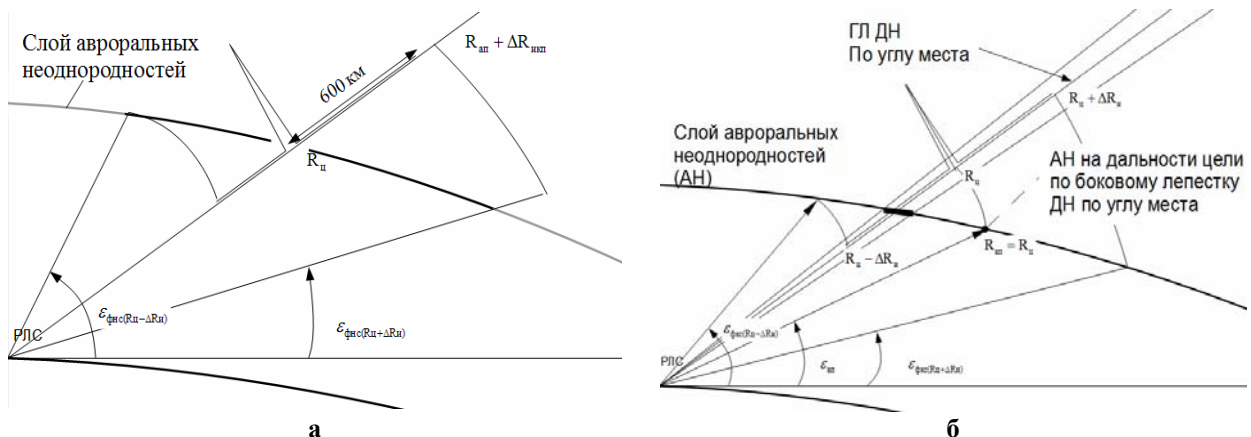
где  $\Pi_0$  - энергетический потенциал РЛС (отношение сигнал шум от цели на наклонной дальности 1000 км, с эффективной площадью рассеяния (ЭПР)  $1 \text{ м}^2$  энергетический потенциал РЛС);  $\sigma$  - ЭПР;  $\eta$  - удельная ЭПР;  $V$  - импульсный объем фасеты (объем фасеты, освещенной РЛС);  $F$  - диаграмма направленности антенны на излучение или прием;  $\chi$  - сечение функция неопределенности сигнала (ФНС) по дальности.

Суммируя по импульсному объему зондирующего сигнала, содержащему неоднородности, получаем выражение для суммарного ОПШ:

$$CNR_{total} = \sum_{\varepsilon} \sum_{\beta} \sum_R CNR(\varepsilon, \beta, R). \quad (2)$$

Важной особенностью данной модели является учет боковых лепестков ДНА и ФНС. Рассмотрим следующие ситуации при регистрации рассеянного сигнала:

- 1) Главный пик проекции ФНС по дальности пересекает слой неоднородностей (рис. 1а). Таким образом, обеспечивается сильное подавление рассеянного сигнала от ионосферных неоднородностей вне главного лепестка ФНС. К ослаблению сигнала на боковых лепестках ФНС в 50 дБ добавляется ослабление в 20 дБ от боковых лепестков угломестной ДНА. Результаты моделирования показали, что сигнал от боковых лепестков ФНС не достигает порога обнаружения РЛС (10 - 15 дБ).
- 2) Главный пик проекции ФНС по дальности находится вне слоя неоднородностей (рис. 1б). Таким образом, происходит усиление сигнала на боковых лепестках ФНС и на боковых лепестках угломестной ДНА. Создается возможность регистрации сигнал, рассеянного на ионосферных неоднородностях не только в главном лепестке ФНС, но и на его боковых лепестках.



**Рисунок 1.** Геометрия приема сигнала от помехи. **а)** главный лепесток ФНС пересекает слой помех, прием осуществляется главным лепестком ФНС; **б)** главный лепесток ФНС находится вне слоя помех, прием осуществляется по главному и боковым лепесткам ФНС

Кроме угломестной проекции ДНА при наличии нулевых локусов в секторе обзора РЛС, важно учитывать и боковые азимутальные лепестки ДНА. Как будет показано ниже, сигнал по боковым лепесткам может также давать превышение порога обнаружения.

### Исходные данные для расчета

Для расчета ОПШ сигнала, рассеянного от ионосферных неоднородностей, и оценки вклада помехи по боковым лепесткам ДНА и ФНС в общее значение ОПШ были выбраны следующие входные параметры:

- Точка стояния РЛС –  $104^0$  в.д.,  $52^0$  с.ш.,  $H = 500\text{м}$  (г. Иркутск)
- $F = 440 \text{ МГц}$  – рабочая частота РЛС
- $\eta = -95 \text{ дБм}^{-1}$  наиболее вероятная удельная ЭПР для данной рабочей частоты РЛС
- $\Pi_0 = 60 \text{ дБ}$  – энергетический потенциал РЛС
- $\beta = 300^0 - 60^0$  – азимутальный сектор обзора (через ноль)

- Центральное значение азимута сектора обзора РЛС  $\beta_0 = 0^\circ$

Точка стояния рядом с г. Иркутск была выбрана из-за наличия нулевых локусов (изолиний со значением ракурсных углов равно  $0^\circ$ ) в секторе обзора станции (рис. 2). Из экспериментальных данных известно [5], что ослабление рассеянного от неоднородностей сигнала при отличии ракурсного угла отличного от нулевого значения имеет следующий вид:

- при ракурсных углах меньше  $3^\circ$ , ослабление увеличивается на 3 дБ с каждым градусом
- при ракурсных углах больше  $3^\circ$ , ослабление составляет 10,5 дБ на каждый градус.

Диаграммы направленности антенны на прием и передачу совпадают и имеют вид  $\frac{\sin x}{x}$ .

В качестве зондирующего сигнала используется ЛЧМ сигнал.

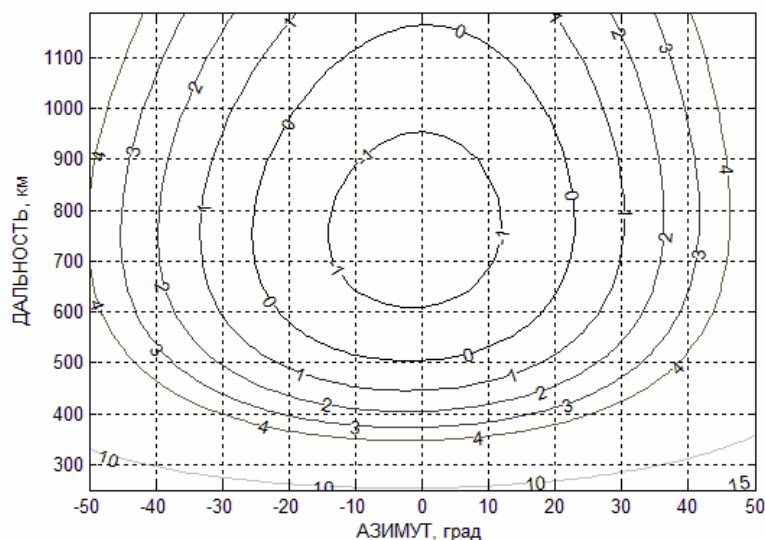


Рисунок 2. Изолинии ракурсных углов на высоте 115 км для станции с точкой стояния в г. Иркутск

### Расчет ОПШ с учетом боковых азимутальных лепестков ДНА

На рис. 3 приведены результаты расчета, наглядно показывающие как учет азимутальных лепестков ДНА влияет на регистрацию. Пунктиром показано ОПШ только в главном лепестке ФНС. Сплошной линией показан случай учета боковых лепестков ФНС и ДНА. В этом случае рассеянный сигнал суммируется не только в пике ФНС, но и по боковым лепесткам ФНС и азимутально-угломестным проекциям ДНА. Сравнивая ОПШ на рис. 3 можно оценить вклад сигналов, полученных боковыми лепестками ФНС и азимутальной ДНА. Их учет дает вклад  $\sim 6$  дБ, что делает возможным превышение порога обнаружения ( $\sim 10-15$  дБ) для боковых лепестков ФНС.

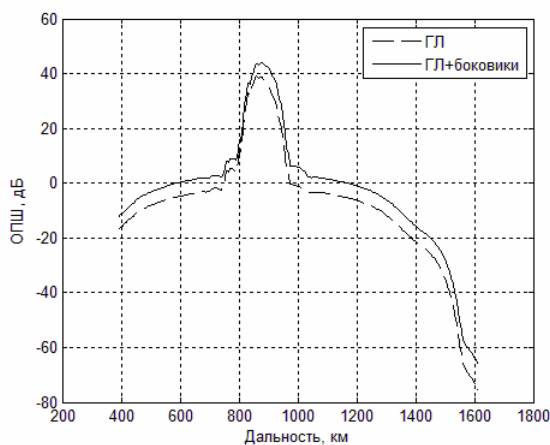


Рисунок 3. ОПШ ЛЧМ сигнала, рассеянного от ионосферных неоднородностей. Пунктиром показана реализация геометрии 1, сплошная линия показывает суммарное ОПШ обеих геометрий.

## Выводы

Современные РЛС дальнего обнаружения обладают высоким энергетическим потенциалом, т.е. имеют высокую чувствительность. Следствием этого стала возможность регистрации помехи не только в главном лепестке ФНС и ДНА, но и боковыми лепестками, что увеличивает вероятность ложных отметок.

Предложенная фасеточная модель сигнала авроральной помехи позволяет численно оценить энергетические характеристики отражений от ионосферных неоднородностей слоя E. Учет в расчетах радиоотражений, принимаемых из главного лепестка диаграммы направленности антенны (ДНА) по углу места, модулируемых боковыми лепестками функции неопределенности сигнала (ФНС) и боковыми азимутальными лепестками ДНА необходим для корректного определения интенсивности помехи. Полученные результаты подтверждаются экспериментальными данными сна РЛС в северных широтах с сектором обзора, направленным на север.

## Список литературы

1. Unwin R.S., Knox F.B. The morphology of the VHF radio aurora at sunspot maximum. - IV. Theory. - *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1968, v. 30, N 1, p. 25-46.
2. Uspensky M. V., Janhunen P., Koustov A. V. and Kauristie K. Volume cross section of auroral radar backscatter and RMS plasma fluctuations inferred from coherent and incoherent scatter data: a response on backscatter volume parameters. *Ann. Geophys.*, 29, 1081-1092, 2011.
3. Успенского М.В. и Старкова Г.В. Полярные сияния и рассеяние радиоволн. - Л.: Наука. Ленингр. отделение, 1987. УДК 550.388
4. Fejer B. G., Kelley M. C. Ionospheric irregularities. *Rev. Geophys. and Space Phys.* 1980. Vol. 18., P. 401-454.
5. Эгеланда А., Холтер О., Омхольт А. Космическая геофизика. Издательство "Мир", Москва 1976, стр. 492