

УДК 551.509.9

АНОМАЛЬНОЕ РАДИОЭХО ПРИ СУПЕРРЕФРАКЦИИ РАДИОВОЛН

М.Т. Абшаев, А.М. Абшаев, А.Х. Гергоков
ФГБУ "Высокогорный геофизический институт", г. Нальчик

Введение

Применяемые в практике противорадовой защиты (ПГЗ), штормооповещения и метеорологического обеспечения авиации автоматизированные радиолокационные метеорологические комплексы (АМРК) «АСУ-МРЛ», «Метеоячейка», «АКСОПРИ», «Мерком», «Титан» предусматривают вычитание радиоэха местных предметов, записанных в безоблачную погоду, с тем, чтобы на дисплее отображать лишь радиоэхо облаков и осадков.

Однако зачастую наблюдаются ситуации, когда в безоблачные ночи (особенно в теплый период года) за счет радиационного выхолаживания земной поверхности формируется приземный слой инверсии температуры и влажности воздуха, приводящий к повышенной положительной рефракции радиоволн. При этом метеорологические радиолокаторы (МРЛ) обнаруживают радиоэхо местных предметов (неоднородности рельефа, возвышенности, здания и сооружения), расположенные ниже уровня стандартного радиогоризонта. В некоторых ситуациях во второй половине ночи и утром формируются условия для положительной суперрефракции радиоволн, когда аномальное радиоэхо имеет такую мощность, что может расцениваться как радиоэхо сильных ливневых осадков, гроз, града и является источником ложных тревог.

Существующие методы фильтрации аномального радиоэха [2 - 4] предусматривают запись в АМРК набора файлов местных предметов при разных условиях рефракции и последующий субъективный выбор из них подходящего для данной ситуации файла для вычитания. Однако такой подход не оперативен в применении и лишает возможности полной автоматизации радиолокационных наблюдений и подготовки сообщений в сеть штормооповещения, так как места возникновения и мощность аномального радиоэха могут изменяться в зависимости от метеорологической обстановки.

Проблема фильтрации аномального радиоэха актуальна для всех типов МРЛ, включая доплеровские, о чем говорит опыт эксплуатации сети доплеровских радиолокаторов в США, Германии и других странах [4].

Целью настоящей работы являлась разработка метода, алгоритмов и программ автоматической фильтрации аномального радиоэха.

1. Условия формирования и виды рефракции микрорадиоволн

Аномальное радиоэхо обусловлено повышенной, критической и супер рефракцией радиоволн. Причиной рефракции радиоволн является наличие вертикального градиента показателя преломления в атмосфере n , который для микрорадиоволн сантиметрового диапазона определяется выражением:

$$(n-1)10^6 = \frac{78}{T} \left(P + \frac{4799e}{T} - \frac{e}{7} \right), \quad (1)$$

где P - давление в мб; T - температура в градусах Кельвина; e - упругость водяного пара в мб.

Эти параметры атмосферы с высотой обычно убывают, соответственно уменьшается и показатель преломления. Вследствие этого скорость распространения радиоволн с высотой растет, что приводит к отклонению траектории радиолуча в сторону среды с большей диэлектрической проницаемостью, т.е. радиолуч отклоняется к поверхности Земли. Искривление радиолуча тем больше, чем больше вертикальный градиент показателя преломления dn/dh или значения вертикального градиента приведенного коэффициента преломления dM/dh , где M равно [1]:

$$M = (n-1) \cdot 10^6 = [(n-1) + h/r_3] \cdot 10^6, \quad (2)$$

где r_3 - радиус земли равный 6371 км.

Для «стандартной радиоатмосферы», в которой температура воздуха на уровне моря равна 288 К и с высотой падает по линейному закону с градиентом 6,5 К/км, давление $P_0 = 760$ мб и падает с высотой по барометрическому закону, давление водяного пара $e_0 = 0,76$ мб и убывает с высотой по экспоненциальному закону, вертикальный градиент показателя преломления равен $4 \cdot 10^{-8} \text{ м}^{-1}$.

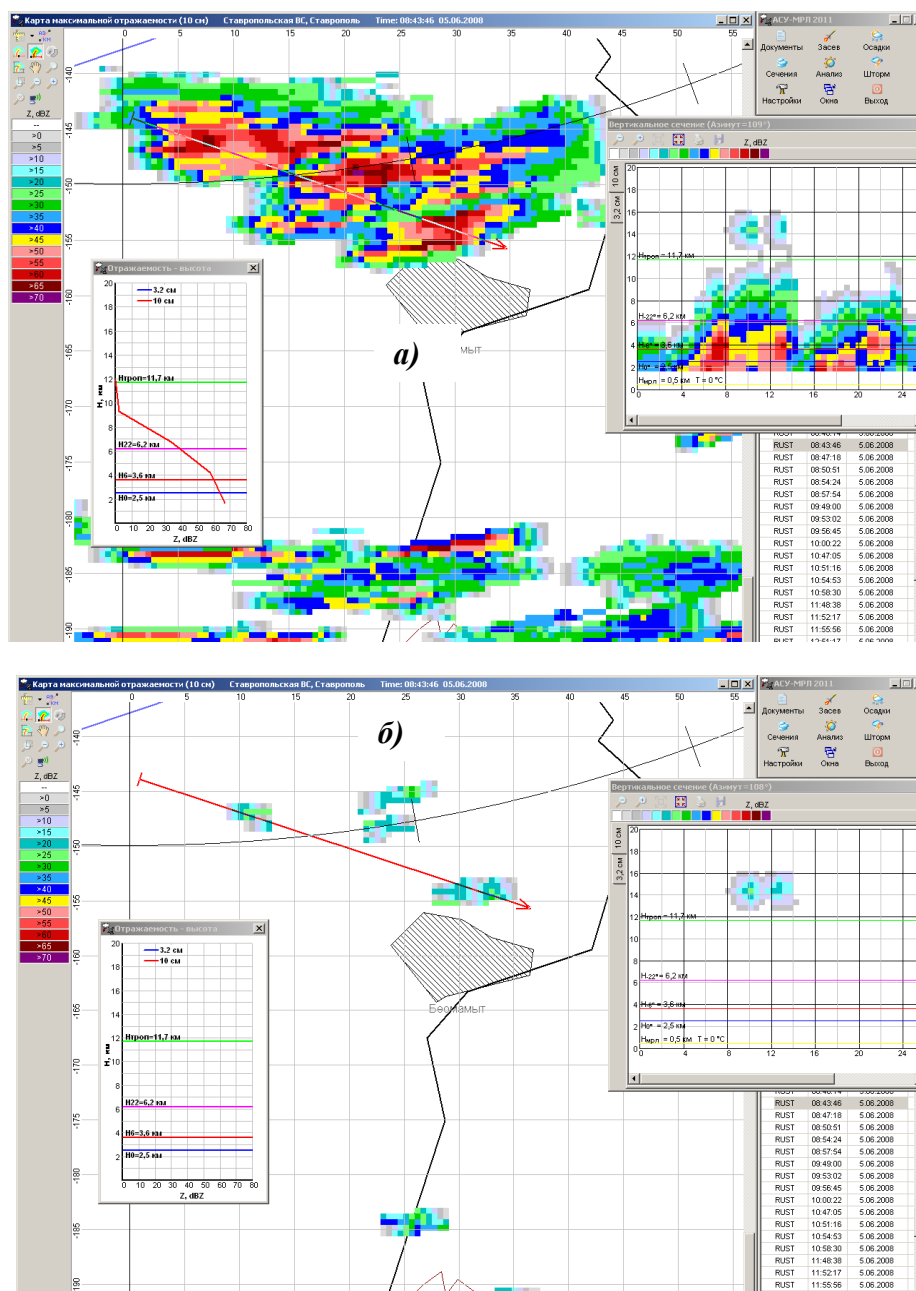


Рис. 1. Пример случая суперрефракции: а) без фильтрации; б) с фильтрацией аномального радиозэха. 05.06.2008 г. Местное время 08⁴³.

Искривление радиолуча в стандартной атмосфере называется нормальной рефракцией. При этом высота радиолуча над поверхностью земли H с учетом его кривизны согласно модели, по которой эффективный радиус кривизны радиолуча $r_{ЭЗ} \approx 4/3r_3 \approx 8500$ км [2], рассчитывается по формуле:

$$H = [R^2 + 7,225 \cdot 10^7 + 2R \cdot 8500 \cdot \sin \alpha]^{0.5} - 8500 + H_{МРЛ}, \quad (3)$$

где R – расстояние до цели; α – угол обзора; $H_{МРЛ}$ – высота антенны МРЛ над уровнем моря.

В реальной атмосфере вертикальный градиент показателя преломления воздуха dn/dh изменяется в зависимости от метеорологической ситуации в широких пределах. В зависимости от его значения возможны условия:

- отрицательной рефракции (при $dn/dh > 0$), когда луч отклоняется от земли;
- отсутствия рефракции (при $dn/dh = 0$);
- положительной нормальной рефракции (при $dn/dh = -4,8 \cdot 10^{-8} \text{ м}^{-1}$);
- повышенной рефракции (при $-4,8 \cdot 10^{-8} < dn/dh < -15,7 \text{ м}^{-1}$);
- критической рефракции (при $dn/dh = -15,7 \cdot 10^{-8} \text{ м}^{-1}$), когда луч распространяется вдоль поверхности земли, приводя к сверхдальному обнаружению целей;

– суперрефракции (при $dn/dh < -15,7 \cdot 10^{-8} \text{ м}^{-1}$), когда луч распространяется по атмосферному волноводу, испытывая полное отражение от верхней границы слоя инверсии, потом отражается от поверхности земли и т.д.

При проведении радиолокационных метеорологических наблюдений проблемы возникают в случаях повышенной, критической и суперрефракции, когда при нулевых и малых углах возвышения антенны (до 3^0) имеет место обнаружение местных предметов, расположенных ниже радиогоризонта. Радиозэхо таких целей зачастую имеют большую мощность и при автоматизированных наблюдениях могут расцениваться как очаги гроз, града, ливневых осадков и других ложных объектов.

Такие ситуации отмечаются при формировании приземного слоя инверсии температуры и влажности воздуха чаще всего за счет ночного выхолаживания поверхности земли, при наличии адвективных и радиационных туманов, а также при оседании воздуха в областях повышенного давления. Тесная связь условий распространения радиоволн с метеорологической обстановкой и синоптической ситуацией позволяет прогнозировать явление рефракции радиоволн вообще и суперрефракции в частности. Однако прогноз величины рефракции и его оперативное применение на практике сетевых радиолокационных наблюдений крайне затруднен.

2. Результаты полевых исследований аномального радиозэха

Анализ данных полевых радиолокационных исследований частоты, времени формирования, суточного хода интенсивности и источников (объектов орографии) аномального радиозэха в горных и равнинных районах Северного Кавказа показал, что аномальные радиозэхо наблюдаются практически во все летние безоблачные безветренные ночи обычно с $22^{00} - 23^{00}$ до $9^{00} - 10^{00}$ утра. В некоторых случаях они наблюдаются до 11 утра. Конфигурация аномального радиозэха на карте максимальной отражаемости имеет изрезанный характер (см. рис. 1) и изменяется от обзора к обзору, что свидетельствует о непрерывном изменении полей градиентов dn/dh и условий рефракции.

Мощность радиозэха обычно (но не всегда) увеличивается в течение ночи, имеет максимальное значение в утренние часы (на восходе солнца) и по мере прогрева земной поверхности убывает до исчезновения.

Максимальная отражаемость аномального радиозэха у нижней границы может достигать значений $Z = 65 - 70 \text{ dBZ}$ (см. рис. 1), характерных для грозовых и градовых облаков, но в отличие от них быстро убывает с высотой. Вертикальный профиль отражаемости и вертикальный разрез радиозэха показывает (см. врезки с правой стороны рис. 1), что в некоторых случаях над основным аномальным радиозэхом обнаруживается даже радиозэх по боковым лепесткам диаграммы направленности излучения (ДНА).

В каждом регионе аномальное радиозэхо обычно локализуется в одних и тех же местах либо во всех местах одновременно, либо некоторых из них. Источниками аномального радиозэха в Ставропольском крае и Волгоградской области являются неоднородности рельефа, радиозэхо которых при нормальной рефракции не наблюдаются. Примечательно, что на Ставропольском АМРК очень часто аномальное радиозэхо обнаруживается на северо-западе (от возвышенного берега озера Маныч-Гудило), реже на юге (от предгорий и боковых хребтов Главного Кавказского хребта), а иногда на юго-востоке (от холмов на преимущественно равнинной территории). Причем одновременно во всех этих местах радиозэхо обычно не наблюдаются. Количество, площадь и мощность аномального радиозэха в разные дни, и разное время суток варьирует в широких пределах.

Это приводит к тому, что их фильтрация стандартными методами требует обширного набора файлов местников орографических предметов. Выбор адекватного для сложившейся ситуации файла в оперативной практике не удобен и исключает возможность полной автоматизации операций штормооповещения и обуславливает практическую значимость разработки метода автоматической фильтрации аномального радиозэха.

3. Метод автоматической фильтрации аномального радиозэха

В данной работе предлагается метод автоматической фильтрации аномального радиозэха, могущего появляться в разных секторах и удаленностях. В основу метода положено, то обстоятельство, что аномальное радиозэхо обычно расположено в приземном слое и его отражаемость быстро падает с высотой. Метод реализован в рамках программного обеспечения АМРК «АСУ-МРЛ» и в зависимости от ситуации предусматривает три режима фильтрации:

– «Мягкая фильтрация», которая отсекает все приземные радиозэхо в слое H_C , если выше этого слоя (т.е. в слое облакообразования) нет радиозэха с радиолокационной отражаемостью $Z > 5 \text{ dBZ}$, где H_C зависит от сезона года:

$$\Rightarrow H_C = H_{\text{МРЛ}} + 1,5 \text{ км при } H_0 < 0,5 \text{ км (в зимний период);}$$

$$\Rightarrow H_C = H_{\text{МРЛ}} + 2 \text{ км при } 0,5 \leq H_0 \leq 2,5 \text{ км (в переходный период);}$$

$$\Rightarrow H_C = H_{\text{МРЛ}} + 3 \text{ км при } H_0 > 2,5 \text{ км (в летний период).}$$

– «Средняя фильтрация», которая отсекает все области радиоэха, если при угле обзора выше 1 градуса, не обнаруживается радиоэхо с $Z > 5$ dBZ. Эту фильтрацию можно ужесточить при повышенной рефракции, взяв вместо 1 градуса 2 или 3 градуса;

– «Жесткая фильтрация», которая применима в условиях формирования атмосферных волноводов с суперрефракцией. При этом отсекаются области радиоэха, в которых значения Z максимальны у земли и быстро уменьшаются с высотой.

Предусмотрена опция установки временных рамок действия фильтрации: по местному времени (для применения в практике ПГЗ) или по Гринвичу (для применения в практике штормооповещения).

При наличии облачности с отражаемостью $Z > 5$ dBZ выше слоя фильтрации эта облачность отображается практически без искажения.

Этот метод апробирован в разных регионах, включая горные районы, и внедрен в практику работы противорадовых служб, штормооповещения и обеспечения безопасности полетов авиации.

Опыт применения метода на практике ПГЗ (в Ставропольском крае, Армении, Украине, Молдавии, Таджикистане, Македонии, Сербии), а также в практике штормооповещения (в Международных аэропортах «Гумрак», г. Волгоград и «Звартноц», г. Ереван) показал, что для исключения аномального радиоэха в большинстве случаев, достаточно включить «Мягкую фильтрацию», реже - «Среднюю фильтрацию» при угле 1 или 2 градуса и еще реже «Жесткую». Выбор режима и углов фильтрации осуществляется по данным конических или горизонтальных сечений, начиная с «мягкой» фильтрации. Если ее недостаточно, то включается «средняя» или «жесткая» фильтрация.

В программном обеспечении «АСУ-МРЛ» предусмотрены опции по установке режима фильтрации в программе управления МРЛ «Radar.exe» и в программе формировании объемного файла обзора и вторичной обработки информации «ASU-MRL.exe». Опция в программе «Radar.exe» предусматривает формирование объемных файлов обзора с фильтрацией аномального радиоэха. Опция в программе «ASU-MRL.exe» позволяет осуществлять формирование и запись объемных файла обзора без фильтрации, а визуализацию карт явлений погоды осуществлять с учетом фильтрации.

Применение такой системы фильтрации аномального радиоэха повышает удобство радиолокационных наблюдений и надежность штормооповещения. Формирование, кодирование (в коды FM-94 BUFR и RAOB), а также передача пакетов информации с фильтрацией ложных гроз, града и ливневых осадков в сеть штормооповещения от Волгоградского, Ставропольского и Зеленокумского АМПК «АСУ-МРЛ» с 2007 года осуществляется автоматически. Сравнение радиолокационных данных с данными наземной сети метеонаблюдений показывает, что оправдываемость радиолокационного оповещения об опасных явлениях погоды составляет 95 – 98%. До введения такой фильтрации были частые нарекания о ложных грозах от службы метеобеспечения авиации.

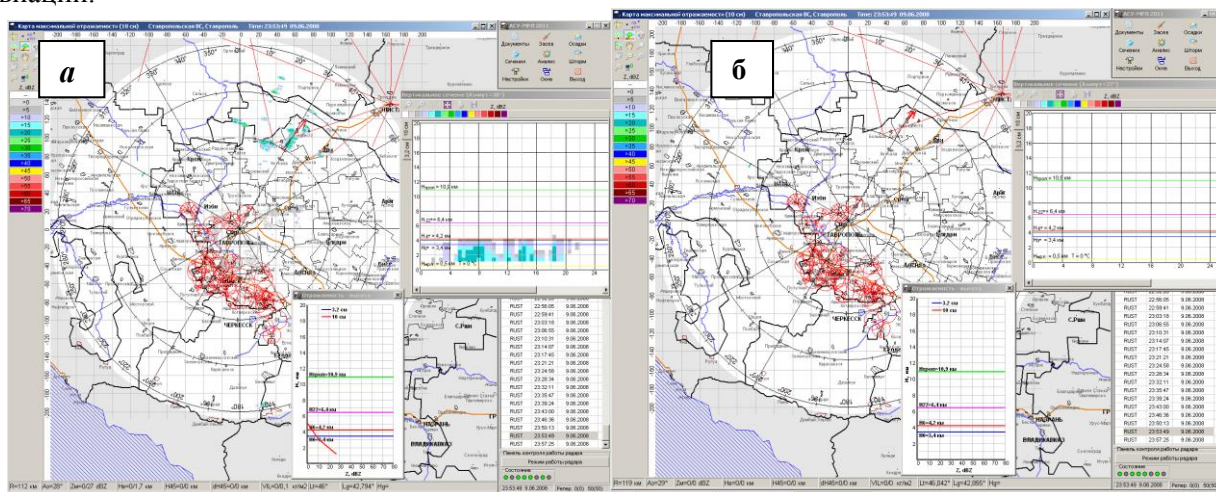


Рис. 2. Пример случая умеренной рефракции: а) - без фильтрации; б) - с фильтрацией аномального радиоэха. 09.06.2008 г. Местное время 23⁵⁴.

На рис. 1а) представлен один из самых сложных и редко встречающихся случаев суперрефракции, когда отражаемость аномального радиоэха в отдельных точках достигает 70 dBZ, а его высота по боковым лепесткам ДНА достигает 16 км. Из рис. 1б) следует, что все приземные аномальные радиоэхо успешно отфильтрованы в режиме «жесткой» фильтрации. Осталось только слабое радиоэхо, обнаруживаемое боковыми лепестками (ДНА). На рис. 2 представлен случай умеренной рефракции, когда аномальное радиоэхо (рис. 2а) полностью отфильтровано в режиме средней фильтрации (рис. 2б).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемый метод применим для некогерентных и доплеровских МРЛ. Доплеровские МРЛ имеют возможность селекции и подавления неподвижных местных предметов. Однако это не обеспечивает достаточную фильтрацию аномального радиоэха без привлечения спектральных поляриметрических параметров сигнала [4]. Применение предлагаемого простого метода в дополнение к фильтрации неподвижных целей может обеспечить повышение эффективности фильтрации помех в МРЛ не имеющих двойной поляризации.

ლიტერატურა – REFERENCES – ЛИТЕРАТУРА

1. Альперт Я. Л. Распространение радиоволн и ионосфера. М.: - Изд. АН СССР. 1960. –480 с.
2. Довиак Р., Зрнич Д. Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения. Л.: - Гидрометеиздат, 1988. – 512 с.
3. Метеорологические автоматизированные радиолокационные сети / Т.А. Базлова, Н.Б. Бочарников, Г.Б. Брылев и др. – СПб.: – Гидрометеиздат, 2002. – 331 с.
4. Zrnic D.S. and Melnikov V.M. Ground clutter recognition using polarimetric spectral parameters // 33th Intern. conf. on Radar Meteorology. 2007. Pp 473 - 478.

UDC 551.509.9

ANOMAL RADIOECHO AT SUPER REFRACTION OF RADIO WAVES./ M.T.Abshaev, A.M.Abshaev, A.Kh.Gergokov/ Transactions of the Institute of Hydrometeorology, Georgian Technical University. -2013. -V.119. -pp. 145-149 -Russ.; Summ. Eng., Russ

The problem of nonlinear radio beam propagation at anomal atmosphere refraction is considered. Its dependence from dielectric refractive index is represented. The methods of filtration false radio echo in automated weather radars successfully passed tests in different geographical area are suggested.

УДК 551.509.9

АНОМАЛЬНОЕ РАДИОЭХО ПРИ СУПЕРРЕФРАКЦИИ РАДИОВОЛН./ М.Т. Абшаев, А.М. Абшаев, А.Х. Гергоков/ Сб. Трудов Института Гидрометеорологии Грузинского Технического Университета. -2013.-т.119.-с.145-149 -Рус., Рез. Англ., Рус.

Рассматривается проблема непрямолинейного распространения радиолуча при аномальной атмосферной рефракции. Приведена ее связь с диэлектрическим коэффициентом преломления. Предложены методы фильтрации ложного радиоэха в автоматизированных метеорологических радиолокаторах, прошедшие успешную апробацию в различных физико-географических регионах.