

УДК 621.371

Д.П. Пашков

Национальный университет обороны Украины имени Ивана Черняховского, Киев

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ПРИЕМА РАДИОСИГНАЛОВ В МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЯХ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

На основе анализа литературы относительно распространения радиоволн в тропосферном слое Земли определены особенности многолучевости радиосигнала. В статье предлагается учитывать данное свойство при применении метеорологических радиолокационных станций на основе двухчастотного метода измерения передаточной функции при осуществлении экологического мониторинга.

**Ключевые слова:** анализ, метеорологическая радиолокационная станция, экологический мониторинг.

### Введение

**Актуальность темы.** На сегодняшний день одним из возможных направлений прогнозирования состояния оценки экологической обстановки в регионе является использование данных метеорологического радиолокационного наблюдения тропосферы, в том числе и определение сильных штормов и аномальных распространений. Метеорологические радиолокационные станции представляют собой специализированные радиолокаторы штормового оповещения и градозащиты, а также предназначены для решения следующих задач [1, 2]:

- обнаружения и определения местоположения очагов гроз, града и ливневых осадков в радиусе ~300 км и измерение их физических характеристик;
- определения горизонтальной и вертикальной протяженности метеообразований, направления и скорости их перемещения;
- определения верхней и нижней границы облаков;
- измерения мощности радиоэха метеорологических целей.

Таким образом, учитывая состояние тропосферного слоя можно определить особенности оценки метеорологической обстановки при проведении экологического мониторинга [1, 2].

**Анализ литературы.** Обзор работ [3 – 6], показал, что на сегодняшний день ведутся активно исследования условий распространения радиоволн в тропосфере и их особенностей, в том числе распространения радиосигналов сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн (СМВ и ММВ). При этом для оценки условий распространения радиосигналов в канале передачи существуют различные методы [5, 6], с помощью которых собран большой объем экспериментальных данных характеризующих влияние тропосферы на радиосигналы СМВ и ММВ диапазонов.

**Цель статьи.** Поэтому целью статьи является на основе анализа особенностей распространения радиоволн в тропосферном слое Земли разработать

пути повышения качества приема радиосигнала в метеорологических радиолокационных станциях для проведения экологического мониторинга.

### Изложение основного материала

**Методы измерения характеристик радиосигнала тропосфере.** В экспериментальных работах по оценке условий распространения сверхвысокочастотных сигналов в тропосферном слое использовался метод измерения импульсной переходной функции [6]. При этом на вход радиоканала в момент времени  $t=t_0-\tau$  подавался короткий импульс  $\delta(t-t_0+\tau)$ , а на выходе в момент  $t=t_0$  наблюдалась импульсная реакция  $H(t_0, \tau)$ . Если обозначить через  $T$  длительность отклика на  $\delta$  – импульс ( $T$  – время многолучевости), то подавая на вход исследуемого радиоканала последовательность импульсов

$$\sum_{i=0}^{\infty} \delta[t-t_0-iT_n+\tau], \quad (1)$$

с периодом  $T_n \geq T$ , на выходе получим последовательность неперекрывающихся во времени откликов

$$\sum_{i=0}^{\infty} H[t_0+iT_n, \tau]. \quad (2)$$

Очевидно, что условием применения импульсного метода является медленность изменения  $H(t, \tau)$  по переменной  $t$  за время  $T_n$ . Вследствие невозможности получения идеального  $\delta$  – импульс, на практике его заменяют коротким импульсом. Так установлено [5], что наименьшая временная задержка, которую можно надежно измерить импульсным методом, примерно в 2 раза больше ширины импульса. Из анализа литературы [6] многолучевость, обусловленная отражениями от инверсных слоев тропосферы (скрытая трасса протяженностью 35 км), составила 5 – 7 мсек. При длительности зондирующего импульса  $\tau_n \approx 3$  мсек. Отсюда следует одно из ограничений, присущих импульсному методу: низкая разрешающая способность и чувствительность измерительной аппаратуры. При ограниченной пико-

вой мощности электровакуумных и полупроводниковых приборов и неоптимальном приеме простой импульсный метод не является перспективным.

Использование оптимального приема [7], в частности применение гребенчатых фильтров, дает возможность повысить энергетический потенциал измерительной системы. Минимальная полоса частот единичного дискретного канала ограничивается при этом шириной доплеровского спектра исследуемого сигнала, а общий выигрыш определяется отношением полос (фильтров до и после гребенчатого фильтра).

На практике большое распространение получил метод измерения передаточной функции  $H(f,t)$ , связанной с импульсной переходной функцией преобразованием Фурье [8]. Этот метод предполагает применение многочастотного сигнала вида

$$x(t) = \operatorname{Re} \sum_{K=0}^{\infty} \exp j[2\pi(f_0 + K\Delta f) + \varphi_K], \quad (3)$$

при этом выбор величины дискретного сдвига зависит от времени многолучевости  $T$ . Так как передаточная функция канала  $H(f,t)$  с конечным значением  $T$  определяется через интервалы по оси частот  $f$ , взятые через  $1/T$ , то  $\Delta f \leq 1/T$  и сигнал на выходе канала описывается

$$y(t) = \operatorname{Re} \sum_{K=0}^{\infty} H\left(f_0 + \frac{K}{T}, t\right) \exp j\left[2\pi\left(f_0 + \frac{K}{T}\right)t + \varphi_K\right]. \quad (4)$$

Поскольку передаточная функция  $H(f,t)$  является комплексной, то для ее определения необходимо знать модуль  $|H(f,t)|$  – амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) и аргумент  $\arg H(f,t) = \varphi(f,t)$  – фазо-частотную характеристику (ФЧХ). При измерении дискретной функции  $H(f_0 + K/T, t)$ , где  $K=0,1,2,\dots$ , можно пользоваться параллельными и последовательными методами анализа.

При параллельном анализе, когда обработка заключается в умножении принятого сигнала  $y(t)$  на многочастотный опорный сигнал с последующей фильтрацией в полосе, определяемой шириной спектра флуктуаций, применяющаяся аппаратура состояла из нескольких высокостабильных независимых генераторов [8] либо одного генератора и умножителя частоты. При последовательном анализе АЧХ и ФЧХ различными авторами [6, 8] применялись различные методы перестройки амплитуды по частоте, в том числе дискретные. Достоинство указанных методов – большой диапазон перестройки, высокая чувствительность и точность измерений параметров радиосигнала [5]. Временные флуктуации параметров радиоканала накладывают ограничения на скорость последовательного анализа

$$\frac{df}{dt} \gg \frac{d|H(f,t)|}{dt}. \quad (5)$$

Последнее замечание относится также к методу стробоскопического анализа, когда каждая реализа-

ция наблюдаемого процесса является результатом анализа нескольких периодически повторяемых реализаций исходного сигнала [8]. Для неискаженного наблюдения процесса требуется, чтобы полное время его наблюдения было меньше интервала корреляции помех. Тогда каждая реализация исследуемого процесса будет смещаться как целое и искажение формы сигнала при одном цикле анализа не произойдет [5].

Анализ опубликованных работ [5, 8] показывает, что в настоящее время наибольшее распространение получил двухчастотный метод измерения передаточной функции, сочетающий в себе высокую точность измерений, относительную простоту реализации аппаратуры и возможность перекрытия диапазона частот, пока не достижимую другими методами. Данный метод может активно использоваться при проведении оценки экологической обстановки метеорологическими радиолокационными станциями имеющих двухканальные приемники СВВ и ММВ диапазонов [5].

Анализируя полученные экспериментальные данные о влиянии тропосферы на радиосигналы СВВ и ММВ диапазонов [6, 9] следует отметить, что особенности распространения сигналов СВВ и ММВ диапазонов условно можно классифицировать на: распространение в пределах прямой видимости и дальнейшее распространение.

Ограничения полосы пропускания радиоканала в первом случае могут быть вызваны интерференцией прямого луча с преломлением в тропосфере или отраженным от поверхности, или влиянием атмосферных осадков и газов. В работе [4] на основе анализа экспериментальных данных по исследованию углов прихода преломленных в тропосфере лучей приведена оценка (для частот 4-60 ГГц) характеристик широкополосности коротких трасс. Из нее следует, что существует предельная линия трассы, на которой искажения полосы за счет тропосферной многолучевости не превышают заданной величины. Оценка величины частотных искажений тропосферного радиоканала в случае двулучевого радиоканала приведена в работе [4]. Тогда можно считать, что ширина неискаженной полосы передачи определяется выражением

$$\Delta f = \frac{3CL_m}{16h_{ан}^2}, \quad (6)$$

где  $C$  – скорость света;  $L_m$  – длина трассы;  $h_{ан}$  – высота подъема антенны.

В формуле (6) учтено то обстоятельство, что с увеличением высоты подъема антенны разность хода между прямым и отраженным лучами увеличивается, следовательно, эквивалентная полоса уменьшается. Учет совокупности всех факторов, в том числе направленности антенны, возможности раскрыва диаграммы направленности антенны от поверхности раздела, выход из турбулентного призем-

ного слоя и т.д., приводит к выводу о том, что реальная полоса пропускания радиоканала может быть значительно шире рассчитанной по формуле (6).

При этом влияние атмосферных осадков и газов тропосферы на распространение радиосигналов СМВ и ММВ диапазонов, подтверждают что – в диапазоне 10 – 12 ГГц и 30 – 40 ГГц осадки не ограничивают полосы передачи сигналов в пределах нескольких ГГц [5]. Кроме этого определено, что с увеличением расстояния – вероятность появления многолучевого распространения возрастает. Наряду с этим возрастают также интенсивность флуктуаций параметров сигналов [8].

Анализируя часть работ [5, 6], посвященных исследованию влияния многолучевого распространения СМВ и ММВ на надежность протяженных радиоканалов, представляет самостоятельный интерес теоретические исследования статистических свойств замираний сигналов за основе Гауссовой модели замираний. Для нее, в силу центральной предельной теоремы, реальная и мнимая части суммы большого числа интерферирующих радиосигналов оказываются также распределенными по нормальному закону. Для протяженных тропосферных радиолиний такая модель удовлетворительно объясняет наблюдаемые результаты. Однако, для коротких линий прямой видимости, особенно для надводных линий диапазона ММВ, эксперименты с короткими импульсами [6] показали, что, как правило, число интерферирующих сигналов мало, поэтому теоретические результаты, основанные на Гауссовой модели, не согласуются с результатами измерений по статистике глубоких замираний.

В этих условиях для оценки качества распространения радиоволны первостепенное значение приобретают экспериментальные данные, характеризующие замирания. Обобщая полученные ранее результаты и сравнивая их с теоретическими и экспериментальными данными, которые приведены в работах [2, 4], в большинстве случаев можно прийти к выводам, которые приведены в [6], что имеют место исключения для коротких и надводных трасс, однако существуют три основных статических зависимости глубоких замираний сигналов СМВ и ММВ диапазонов на коротких трассах

$$P(U \leq U_0) \approx U_0^2; \quad (7)$$

$$N(U_0) \approx U_0; \quad (8)$$

$$\langle t \rangle(U_0) \approx U_0, \quad (9)$$

где  $U$  – амплитуда сигнала;

$U_0$  – нижний уровень амплитуды сигнала;

$P(U \leq U_0)$  – вероятность того, что амплитуда  $U(t)$  будет замирать ниже выбранного уровня  $U_0$ ;

$N(U_0)$  – число замираний  $U(t)$  ниже уровня  $U_0$  в единицу времени;

$\langle t \rangle(U_0)$  – средняя продолжительность замираний ниже уровня  $U_0$ .

Короткие по времени и глубокие замирания сигналов СМВ и ММВ диапазонов носят интенсивный характер, поэтому могут представлять опасность для передачи широкополосных сигналов. Обстоятельным исследованиям этой проблемы посвящена работа [6] в которой описаны результаты проведения измерения в широком диапазоне дискретных частот (4 – 6) ГГц на двух приземных трассах протяженностью 45,5 км и 47 км. Из выводов авторов следует, что глубокие замирания являются сравнительно редким событием, важной особенностью эксперимента были долговременные непрерывные измерения в нескольких параллельных каналах. Результаты приведенных измерений не обнаруживает в явном виде зависимости выигрыша от частотного разноса в широком диапазоне частот, однако в отдельных реализациях тенденция к его увеличению четко прослеживается [6].

## Выводы

По результатам проведенного обзора и анализа литературы, можно сделать следующие выводы:

1. В коротковолновой части сантиметрового диапазона и в миллиметровом диапазоне искажение формы сигналов в полосе до 1 ГГц пренебрежимо мало.

2. В миллиметровом диапазоне волн основные ограничения на длину трассы радиоканала (трасса прямой видимости) связаны с поглощением сигналов в интенсивных дождях.

3. Искажение формы радиосигналов в дождях и газах атмосферы в полосе частот до 1 ГГц пренебрежимо мало.

4. Кроме этого необходимо уточнения теоретических моделей и углубления исследований физического механизма глубоких замираний на основе проведения экспериментальной части.

## Список литературы

1. Калинин Н.А. Совместное использование данных радиолокационных и станционных наблюдений для анализа облачных полей / Н.А. Калинин, А.А. Смирнова // *Метеорология и гидрология*. – 2002. – № 8. – С. 53-60.
2. Калинин Н.А. Исследование радиолокационных характеристик распознавания опасных явлений погоды, связанных с кучево-дождевой облачностью / Н.А. Калинин, А.А. Смирнова // *Метеорология и гидрология*. – 2005. – № 1. – С. 84-95.
3. *Метеорологические автоматизированные радиолокационные сети / под ред. Г.Б. Брылева*. – СПб.: Гидрометеиздат, 2002. – 331 с.
4. *Распространение радиоволн в тропосфере: Обзор / Г.В. Хитни, Ю.Х. Рихтер, Р.А. Панперт [и др.] // ТИИЭР*. – 1985. – Т. 73, № 2. – С. 106-128.
5. Кравцов Ю.А. Прохождение радиоволн через атмосферу Земли / Ю.А. Кравцов, З.И. Фейзулин, А.Г. Виноградов. – М.: Радио и связь, 1983. – 224 с.
6. Красюк Н.П. Влияние тропосферы и подстилающей поверхности на работу РЛС / Н.П. Красюк, В.Л. Коблов, В.Н. Красюк. – М.: Радио и связь, 1988. – 216 с.

7. Стратонович Р.Л. Принципы адаптивного приема / Р.Л. Стратонович. – М.: Советское радио, 1973. – 144 с.

8. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория / под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: ЗАО МАКВИС, 1998. – 828 с.

9. РД 52.04.320–91. Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизи-

рованных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. – 360 с.

Поступила в редколлегию 11.12.2013

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Г.Л. Баранов, ГП «Центральный НИИ навигации и управления», Киев.

### ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ ПРИЙОМУ РАДІОСИГНАЛІВ В МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СТАНЦІЯХ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

Д.П. Пашков

*На основі аналізу літератури щодо розповсюдження радіохвиль в тропосферному шарі Землі визначені особливості многолучевості радіосигналу. У статті пропонується враховувати дану властивість при застосуванні метеорологічних радіолокаційних станцій на основі двохчастотного методу вимірювання передавальної функції при здійсненні екологічного моніторингу.*

**Ключові слова:** аналіз, метеорологічна радіолокаційна станція, екологічний моніторинг.

### PERFECTION OF METHOD OF RECEPTION OF RADIO SIGNALS IN THE METEOROLOGICAL RADIO-LOCATION STATIONS FOR CONDUCTING OF ECOLOGICAL MONITORING

D.P. Pashkov

*On the basis of analysis of literature in relation to distribution of radio waves in troposphere the layers of Earth are certain the feature of multipathing radio signal. In the article it is suggested to take into account this property at application of the meteorological radio-location stations on the basis of twofrequency method of measuring of transmission function during realization of the ecological monitoring.*

**Keywords:** analysis, meteorological radio-location station, ecological monitoring.