

## ФЛУКТУАЦИИ ПРЯМОГО СИГНАЛА МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА РАДИОВОЛН НА НИЗКОПРОФИЛЬНЫХ ТРАССАХ

В настоящее время широко применяются радиолучевые системы сигнализации для охраны внешнего периметра [1, 2], которые, по сравнению с оптическими датчиками, отличаются всепогодностью и устойчивостью к внешним помехам, которые создаются естественными источниками (Солнце, Луна, молния), а также к искусственным помехам (автомобильные фары, линии электропередач и др.). Подобные системы включают в себя несколько комплектов датчиков в виде передающего и приемного модулей – рис. 1, которые формируют узкий радиолуч вдоль охраняемого периметра. При пересечении луча уровень сигнала на выходе приемника падает ниже установленного порога, что приводит к формированию сигнала тревоги.

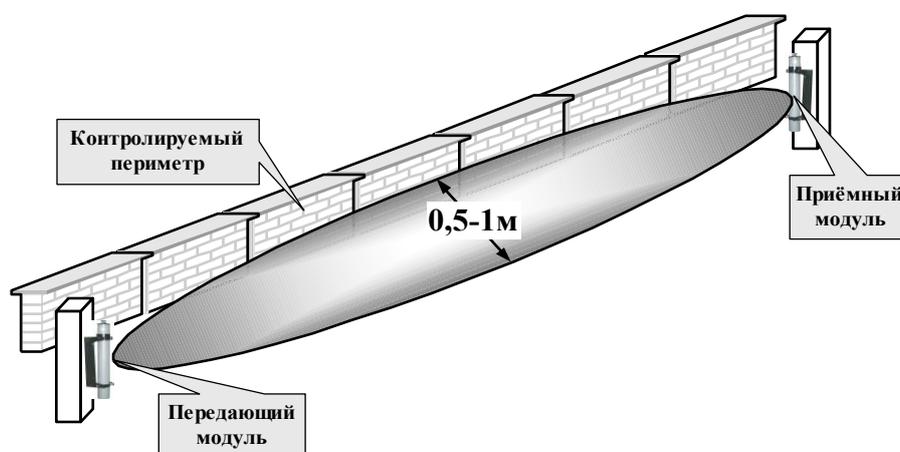


Рис. 1. Схема работы радиолучевого датчика

Однако в результате распространения сигнала на приземной трассе его уровень флуктуирует, что часто приводит к формированию сигнала ложной тревоги. При этом вероятность ложной тревоги определяется соотношением амплитуды флуктуаций и величины порога, который, с одной стороны, должен существенно превышать уровень шумов приемника, а с другой – быть заметно меньше минимального уровня флуктуаций – рис. 2. При этом, как показывает практика, влияние трассы распространения сказывается как в виде медленных изменений среднего уровня за счет интерференции прямого и отраженного сигналов – рис. 3, так и в виде быстрых флуктуаций за счет влияния растительности.

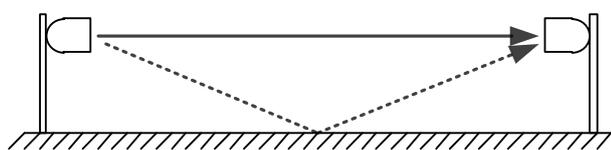


Рис. 3. Трасса распространения сигнала

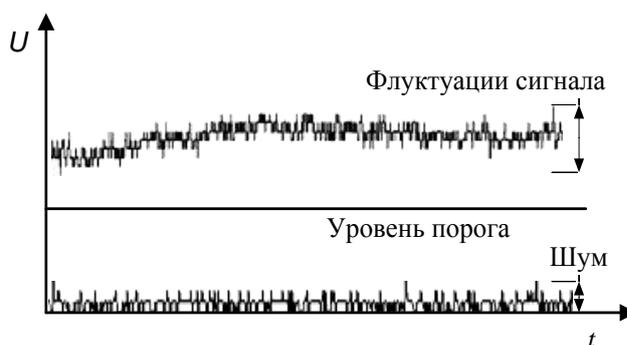


Рис. 2. Временная структура принятого сигнала

Если в первом случае медленные изменения уровня принятого сигнала можно компенсировать автоматической регулировкой усиления в приемном устройстве, то во втором случае, когда скорость флуктуаций соизмерима с

временем пересечения радиолуча порядка  $\tau \approx 0,1$  с, применение подобной регулировки не представляется возможным. В связи с этим, значительный интерес представляет исследование характеристик флуктуаций прямого сигнала на приземных низкопрофильных трассах, когда высота расположения луча не превышает  $\approx 1$  м.

Флуктуации сигналов на приземных трассах достаточно подробно исследовались в ряде работ [3, 4], однако опубликованные результаты получены для расположения радиолуча на высотах порядка единиц метров относительно подстилающей поверхности. Поэтому целью настоящей работы является экспериментальное исследование флуктуаций прямого сигнала на приземной трассе с высотой расположения радиолуча меньше 1 м в различных погодных условиях.

### Экспериментальный стенд

Для проведения экспериментальных исследований сигналов на маловысотной трассе разработан комплекс приемо-передающей аппаратуры в диапазоне волн  $\lambda = 8$  мм (рис. 4). Передатчик содержит генератор на лавинно-пролетном диоде (ЛПД) и модулятор М, который обеспечивает излучение последовательности импульсов мощностью  $P = 12$  мВт, частотой повторения  $F = 1$  кГц и длительностью  $\tau = 100$  мкс.

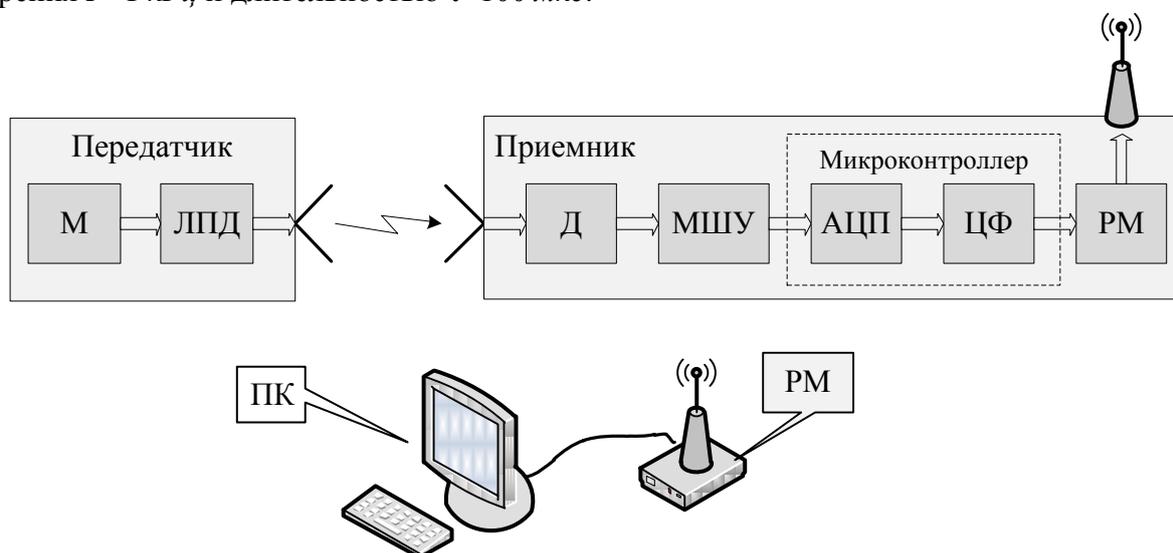


Рис. 4. Схема измерительного стенда: М – модулятор, ЛПД – генератор на лавинно-пролетном диоде, Д – СВЧ детектор, МШУ – усилитель, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, ЦФ – цифровой фильтр, РМ – радиомодем, ПК – персональный компьютер

Приемное устройство содержит СВЧ детектор, сигналы с выхода которого усиливаются малошумящим усилителем (МШУ) и поступает на вход микроконтроллера, который выполняет функции аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и цифрового фильтра (ЦФ). С выхода микроконтроллера данные передаются на удаленный персональный компьютер (ПК) с помощью радиомодема (РМ), что позволяет осуществлять измерения характеристик принятых сигналов в круглосуточном режиме путем их записи в ПК без участия оператора.

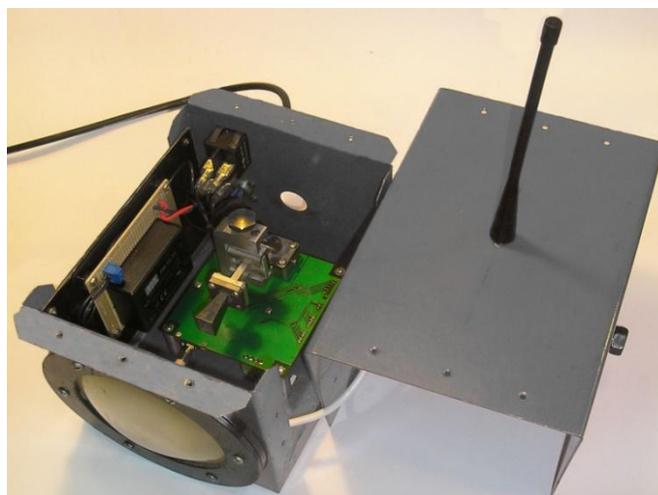


Рис. 5. Общий вид модуля

В передающем и приемном модулях используются две аналогичные рупорно-линзовые антенны диаметром  $D=11,7\lambda$  и фокусным отношением  $f/D=0,5$ , обеспечивая ширину диаграммы направленности  $2\Delta\theta_{0,5}\approx 5,1$  угл. град – рис. 6 и уровень бокового излучения не более  $-20$  дБ.

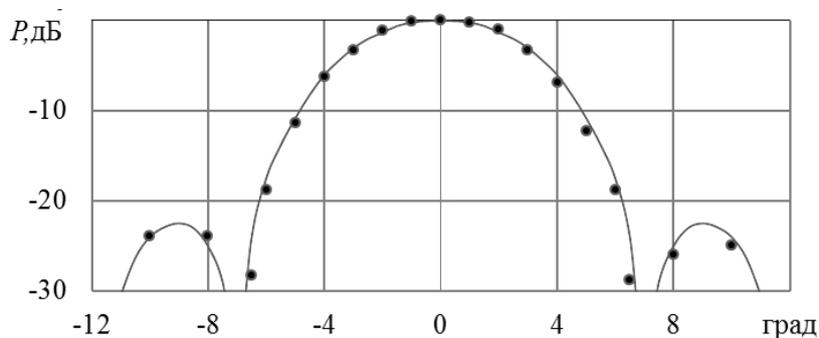


Рис. 6. Диаграмма направленности рупорно-линзовой антенны

При этом экспериментальные данные (точки на рис. 6) удовлетворительно согласуются с расчетом (гладкая кривая) –  $F^2(u) = 10 \lg \left| A \Lambda_1(u) + \frac{B}{2} \Lambda_2(u) \right|^2$  (дБ), где постоянные  $A$  и  $B$  определяются выбранным видом амплитудного распределения в раскрытии и равны  $A=0,3$ ;  $B=0,7$ , чтобы обеспечить спадание поля к краям раскрытия на 10 дБ.

МШУ обеспечивает полосу пропускания  $\Delta f = 100$  кГц при коэффициенте усиления КУ=85 дБ и среднеквадратичным значением напряжения плотности шумов  $8 \hat{A} / \sqrt{\hat{A} \hat{\sigma}}$ , причем динамический диапазон выходных сигналов согласован со входом 8-миразрядного аналого-цифрового преобразователя (АЦП, 0 – 2,5 В), частота дискретизации которого равна  $f_d=25$  кГц для получения необходимой точности восстановления формы принятых сигналов.

№	Наименование параметра	Значение
1	Излучаемая мощность, мВт	12
2	Длина волны, мм	8,52
3	Ширина диаграммы направленности антенны, угл. град	5,1
4	Уровень бокового излучения, не более, дБ	20
5	Частота повторения импульсов, Гц	965
6	Длительность импульсов, мкс	100
7	Коэффициент усиления усилителя, дБ	85
8	Диапазон выходных сигналов, В	0÷2,5
9	Частота дискретизации, кГц	25
10	Полоса пропускания цифрового фильтра, Гц	100
<i>Радиомодем</i>		
11	Несущая частота, МГц	433
12	Скорость передачи данных, бит/с	9600
13	Максимальная дальность, м	300

Полосовая фильтрация принятых сигналов выполняется с помощью нерекурсивного цифрового фильтра с конечно-импульсной характеристикой (КИХ) с полосой пропускания  $\Delta f = 100$  Гц, которая существенно превышает максимальную полосу частот принятого сигнала. Радиомодем служит для передачи данных на расстояние до 300 м (в свободном пространстве) на частоте 433 МГц и обеспечивает скорость передачи данных 9600 бит/с, а основные параметры стенда приведены в таблице.

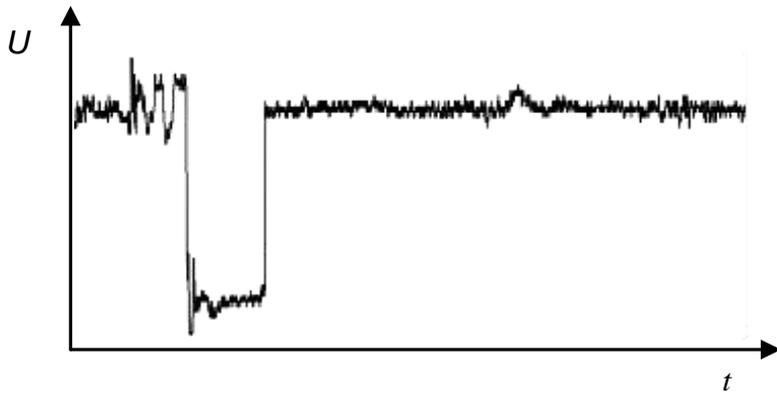


Рис. 7. Сигнал с выхода микроконтроллера

На рис. 7 приведен пример реализации сигнала с выхода микроконтроллера разработанного стенда, установленного на трассе длиной  $L=96$  м. Участок сигнала в начале реализации соответствует пересечению радиолуча человеком, а характерные флуктуации уровня сигнала обусловлены влиянием трассы распространения.

## Результаты экспериментального исследования



Рис. 8. Общий вид трассы измерений и установки датчика

Экспериментальные исследования проводились в осенний период (октябрь-ноябрь) на ровной трассе длиной  $L=96$  м (рис. 8). Приемный и передающий модули установлены в пределах прямой видимости на высоте 0,7 м над подстилающей поверхностью, покрытую упавшей листвой и травой, высота которой не превышает 0,2 м. При этом размер первой зоны Френеля составляет  $D_{\phi} \approx 0,9$  м, а мешающие предметы расположены на расстоянии не менее  $(1 \div 1,5) D_{\phi}$  от оси диаграммы направленности антенны.

Зависимость уровня сигнала, усредненного за время 30 мин, в течение суток в пасмурную погоду, включая порывы ветра с интенсивным дождем до  $I \approx 15$  мм/ч в первой половине дня (9 – 15 ч). Как видно, ослабление сигнала при дожде достигает 4 дБ, которое существенно превышает значение 0,3 дБ, соответствующее широко распространенной модели “Рекомендации международного союза электросвязи МСЭ-R P.838-2/Модель погонного ослабления в дожде”, используемой при прогнозировании затухания сигналов в дождях. Можно предположить, что полученные данные обусловлены рядом причин, в том числе изменением условий многолучевого распространения за счет увлажнения почвы и др.

При этом параметры отраженного сигнала зависят также и от состояния растительности, как показано на рис. 10, а, где приведены результаты измерения среднего уровня сигнала в зависимости от скорости ветра.

Как видно, увеличение скорости ветра приводит к более интенсивному ветровому волнению травяного покрова, что в свою очередь, способствует разрушению зеркальной компо-

На рис. 9 приведена зависимость, которая отражает медленные изменения сигнала в пасмурную погоду, включая

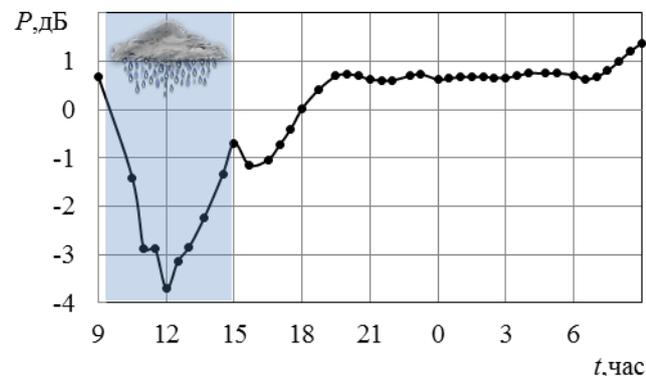


Рис. 9. Суточная зависимость усредненного уровня сигнала

ненты отраженного сигнала и, как следствие, изменению характера интерференционной картины прямого и отраженного лучей.

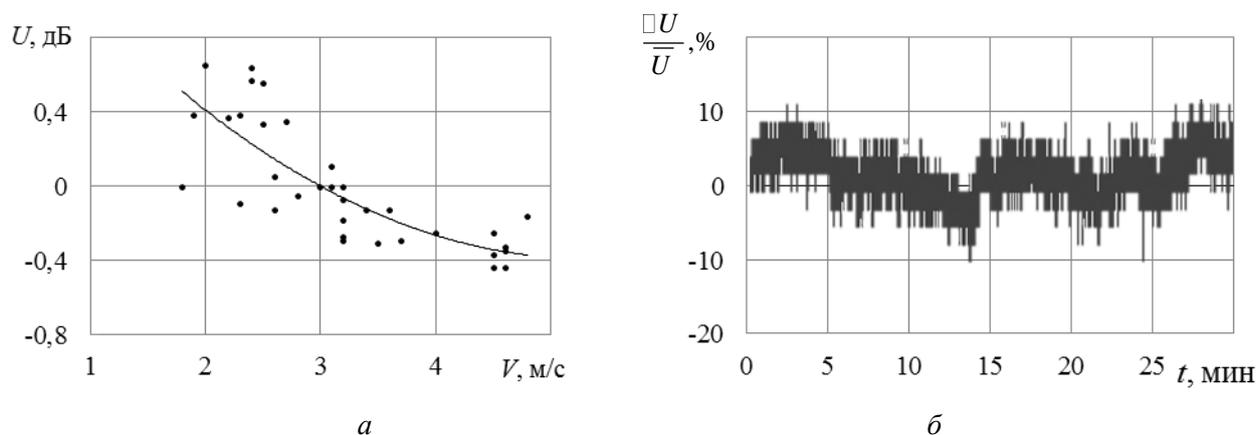


Рис. 10. Средний уровень сигнала (а), пример реализации сигнала (б)

На рис. 10, б приведен типичный пример быстрых флуктуаций сигнала, которые отражают результат интерференции отдельных рассеивателей (трава, листва, мелкие ветки и др.) под действием ветра. По вертикальной оси отложены изменения сигнала относительно его среднего уровня  $(\Delta U/\bar{U}) \cdot 100\%$ , а по горизонтальной оси – время измерений. Как видно, амплитуда флуктуаций обычно не превышает 20 %, что необходимо учитывать при обработке сигналов.

В этой связи представляют интерес характеристики спектра флуктуаций принятых сигналов, которые в значительной мере определяют параметры системы обработки сигналов в датчике радиолучевой системы охранной сигнализации. Так как среднее значение сигнала

$\bar{U} = \frac{1}{T} \int_0^T dt U(t)$  за время реализации  $T$  существенно превышает амплитуду его флуктуаций

$\bar{U} \gg \Delta U(t)$ , то традиционный спектр содержит компоненту от постоянной составляющей

$S_0(\omega) = \bar{U}^2 T \sin \frac{\omega T}{2} / \left( \frac{\omega T}{2} \right)$ , которая в значительной мере маскирует флуктуационную составляющую. Поэтому, нами вычислялся нормированный энергетический спектр флуктуаций принятого сигнала в виде

$\hat{S}(\omega) = \frac{1}{S_m T} \left| \int_0^T dt \Delta U(t) e^{-j\omega t} \right|^2$ , где  $\Delta U(t) = U(t) - \bar{U}$  – флуктуация сигнала,  $S_m$  – максимальное значение спектра.

На рис. 11, а приведен вид спектра флуктуаций для реализации сигнала (рис. 10, б), который показывает, что исследуемые флуктуации представляют собой достаточно медленный процесс. Основная энергия сосредоточена в области весьма низких частот  $f \approx 0,001$  Гц (период  $\approx 15$  мин), интерпретация чего пока не представляется возможным.

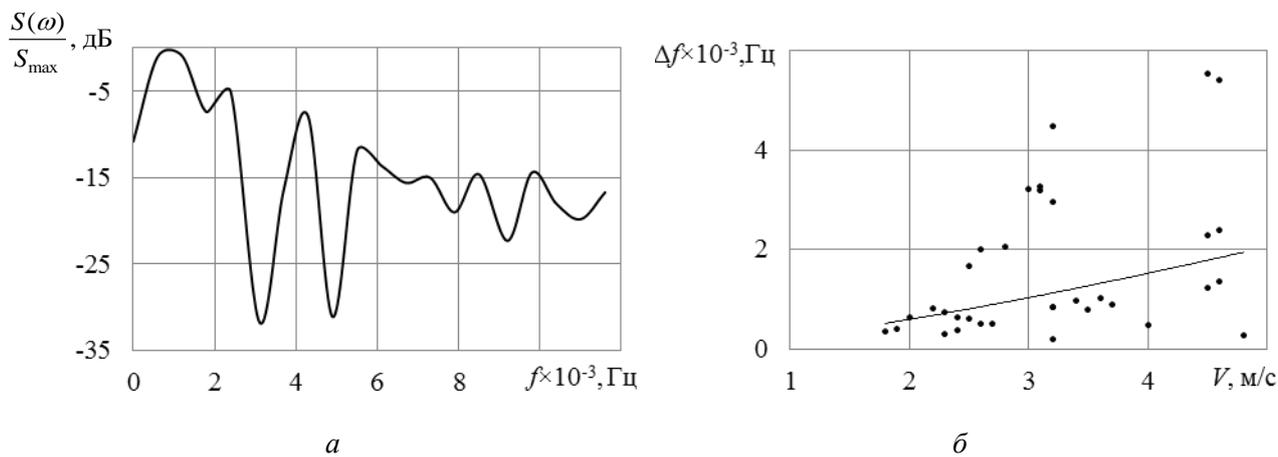


Рис. 11. Спектр флуктуаций сигнала (а), ширина спектра (б)

На рис. 11, б приведены результаты измерения эффективной ширины спектра флуктуаций

принятых сигналов в виде  $\Delta f_{y\delta} = \frac{1}{S_m} \int_0^{f_m} df S(f)$ , где  $f_m = 5 \text{ \AA} \delta$  – максимально частота

исследованных спектров. Обычно считается, что флуктуации сигналов, отраженных от растительности определяются, в основном, пульсациями скорости ветра [3], которые, в рассматриваемом случае, не измерялись. С другой стороны, пульсации ветра практически пропорциональны средней скорости ветра, которую достаточно просто измерить. Поэтому в настоящей работе используется модель флуктуаций отраженного сигнала в виде степенной зависимости эффективной ширины спектра от средней скорости ветра  $\Delta f_{ef} = (\beta/\lambda) \cdot \bar{V}^\gamma$  [5], где показатель степени имеет порядок величины  $\gamma=1,34$ . Параметр  $\beta = m_v \cdot 2\sqrt{2} = 2,0$  определяется глубиной хаотической модуляции скорости отдельных рассеивателей под действием ветра [5] и в рассматриваемом случае равен  $m_v=0,71$ . Полученные данные в основном соответствуют опубликованным результатам исследований спектра когерентных сигналов коротковолновой части миллиметрового диапазона, отраженных от растительности [6] (показатель степени  $\gamma=1 - 1,3$ ). Однако коэффициент модуляции заметно превышает опубликованные данные ( $m_v \approx 0,05$ ,  $\lambda=2 - 3 \text{ мм}$  [7]), что можно объяснить разным характером флуктуаций когерентных и некогерентных сигналов, а также разным диапазоном длин волн.

## Выводы

Таким образом, в результате проведенных работ можно сделать следующие выводы:

1. Разработан комплекс приемо-передающей аппаратуры в диапазоне  $\lambda=8 \text{ мм}$  для проведения экспериментальных исследований флуктуаций сигналов на маловысотной трассе.

2. Проведен цикл экспериментальных исследований флуктуаций прямого сигнала в натуральных условиях в осенний период (октябрь – ноябрь) на ровной трассе длиной  $L=96 \text{ м}$  высоте  $0,7 \text{ м}$  над подстилающей поверхностью, покрытой упавшей листвой и травой (высота  $\leq 0,2 \text{ м}$ ).

3. Показано, что ослабление сигнала в период дождя на  $4 - 4,5 \text{ дБ}$  обусловлено, в основном, изменением условий интерференции прямого и отраженного лучей за счет вариации коэффициента отражения влажной подстилающей поверхности.

4. Средний уровень отраженного от подстилающей поверхности сигнала определяется также ветровым волнением растительности и зависит от средней скорости ветра. Увеличение скорости ветра приводит к более интенсивному волнению травяного покрова, что в свою очередь, способствует разрушению зеркальной компоненты отраженного сигнала и, как следствие, изменению уровня отраженного сигнала.

5. Основная энергия флуктуаций сосредоточена в области очень низких частот  $f_0 \approx 0,001$  Гц (период  $\approx 15$  мин).

6. Эффективная ширина энергетического спектра флуктуаций отраженного сигнала удовлетворительно аппроксимируется степенной зависимостью от средней скорости ветра в виде  $\Delta f_{ef} = (\beta/\lambda) \cdot \bar{V}^\gamma$ , где показатель степени имеет порядок величины  $\gamma=1,34$ , а параметр  $\beta=2,0$  и определяется глубиной хаотической модуляции скорости отдельных рассеивателей под действием ветра.

**Список литературы:** 1. Иванов И. В. Охрана периметров. – М. : Паритет Граф, 2000. – 196с. 2. Мадарисов М. Р., Кушнарченко А. М., Оглоблин Д. М., Стрелков И. А. Датчики для охраны помещений // Тр. 2-й Крым. конф. и выставка “СВЧ техника и спутниковый прием”. – Севастополь, 1992. – С.165-166. 3. Кулемин Г. П., Разказовский В. Б. Рассеяние миллиметровых радиоволн поверхностью Земли под малыми углами. – Киев : Наук. думка, 1987. – 232с. 4. Хлопов Г. И. Когерентная радиолокация в миллиметровом диапазоне // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. – 1999. – №9. – С.3-27. 5. Арманд Н. А. и др. Исследование изменения спектра монохроматической волны при отражении от движущихся рассеивателей // Радиотехника и электроника. – 1975. – Т. 20, №7. – С.1337-1344. 6. Капитанов В. А., Мельничук Ю. В., Черников А. А. Спектры радиолокационных сигналов, отраженных от леса в сантиметровом диапазоне радиоволн // Радиотехника и электроника. – 1973. – Т. 18, №9. – С.1816 – 1825. 7. Андреев Г. А., Потапов А. А., Хохлов Г. И. Статистические характеристики ММ волн, отраженных растительностью // Радиотехника и электроника. – 1982. – Т. 27, №10. – С.1863-1868.

*Институт радиофизики и электроники  
им. А. Я. Усикова НАН Украины*

*Поступила в редколлегию 11.06.2013*