

---

# СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

---

УДК 621.396.9

## ПРИБОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВРЕМЕННОГО РАССЕЙВАНИЯ РАДИОВОЛН МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ПРИ МНОГОЛУЧЕВОМ РАСПРОСТРАНЕНИИ

Муравьев В.В.<sup>1</sup>, Наумович Н.М.<sup>1</sup>, Корневский С.А.<sup>1</sup>, Стануль А.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>НП ООО «ОКБ ТСП», г. Минск, Республика Беларусь

*Рассмотрена возможность измерения временного рассеивания при многолучевом распространении сигналов. Приведена схема построения приемно-передающего устройства миллиметрового диапазона длин волн. Моделирование работы измерительного комплекса показало целесообразность использования оконных функций при обработке принятого сигнала. (E-mail: Comrad-1@mail.ru)*

**Ключевые слова:** временное рассеяние, многолучевое распространение.

### Введение

Одной из актуальнейших проблем систем цифровой радиосвязи является проблема многолучевого распространения радиоволн. Городская среда создает специфические условия для распространения радиоволн. Теневые зоны, многократные отражения и рассеяние волн формируют многолучевые поля со сложной интерференционной структурой и резкими пространственными изменениями уровня сигнала. Многолучевой характер распространения радиоволн, когда в точку приема приходят волны разных направлений и с разными временными задержками, порождает явления межсимвольной интерференции при передаче кодовых последовательностей [1, 2]. Искажения сигнала, обусловленные межсимвольной интерференцией, могут вызывать серьезное ухудшение характеристик системы и, в первую очередь, снижение скорости передаваемой цифровой информации, если длительность задержки сравнима с длительностью символа. Необходимой предпосылкой для разработки эффективных систем связи, работающих в городской среде, является

знание характеристик многолучевого канала распространения.

Строгие электродинамические модели и теоретические расчеты по ним не позволяют с достаточной точностью определить профили временного рассеивания и доплеровские спектры сигнала в канале связи, особенно в миллиметровом диапазоне длин волн.

Для решения этой проблемы обычно используют эмпирические модели многолучевого распространения, основанные на экспериментальных исследованиях временного рассеивания и доплеровских спектров при многолучевом распространении сигналов на различных трассах с различными типами подстилающей поверхности.

Для проведения экспериментальных исследований необходимо иметь приемно-передающее устройство, позволяющее обеспечить высокое разрешение по дальности, что эквивалентно высокому временному разрешению. Такие устройства могут работать как в импульсном, так и в непрерывном режимах. Использование импульсного режима работы приемно-передающего устройства требует формирования очень коротких импульсов, что не всегда прак-

тически выполнимо и приводит к малой величине энергии зондирующего сигнала.

Если использовать непрерывный сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ), то появляется большой уровень боковых лепестков корреляционной функции. Поэтому основной целью работы является разработка такой структурной схемы измерительной установки и таких алгоритмов обработки сигналов, которые позволяют обеспечить высокую разрешающую способность по дальности и малый уровень боковых лепестков корреляционной функции сигнала, при использовании непрерывного сигнала с ЛЧМ.

### Схема измерительного комплекса

Структурная схема приема-передающего модуля приведена на рисунке 1.

Измерительный комплекс работает в режиме измерения обратного рассеивания и, по сути,

представляет собой радиолокатор с супергетеродинным приемником на боковой полосе. Такой приемник конструктивно более сложен, чем приемник на нулевой промежуточной частоте, но зато обладает большей чувствительностью и стабильностью в работе [3].

Сигнал с ЛЧМ формируется с помощью генератора, управляемого напряжением, на который подается модулирующее пилообразное напряжение. Диапазон формирования частот генератора, управляемого напряжением, 14,5–15,6 ГГц. Далее часть сигнала попадает в передающее устройство, где частота удваивается, сигнал усиливается и через рупорную антенну излучается в пространство. Таким образом, на выходе передатчика диапазон частот составляет 29–31,2 ГГц, но реально используются сигналы с девиацией частоты до 500 МГц, так как амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) генератора, управляемого напряжением, неравномерна в диапазоне частот.

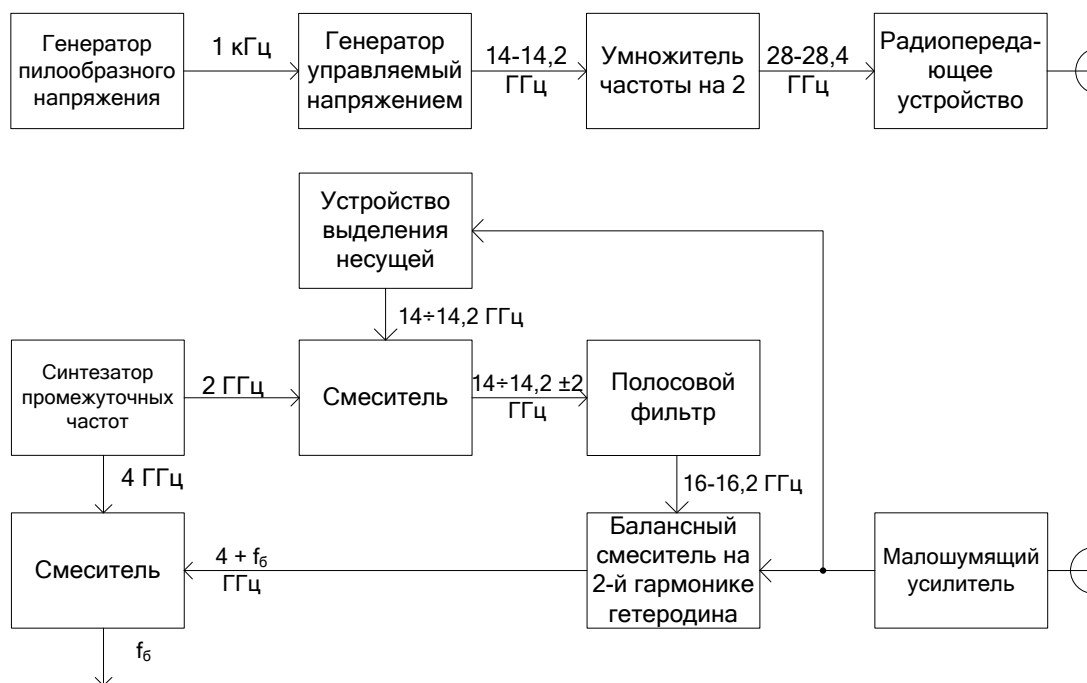


Рисунок 1 – Структурная схема измерительного комплекса

Устройство выделения несущей формирует сигнал, который поступает на смеситель сдвига. Он сдвигает сигнал на 2 ГГц вверх и формирует сигнал гетеродина приемника с частотами  $16,5 \pm 17,6$  ГГц. Высокая промежуточная частота позволяет избежать влияния амплитудно-фазовых шумов гетеродина, что обес-

печивает малый коэффициент шума входного тракта, а также получить с помощью полосового фильтра достаточное подавление разностной частоты после смесителя сдвига.

Сигнал гетеродина поступает на входной балансный смеситель, работающий на 2-й гармонике частоты гетеродина. На этот смеситель

также поступает отраженный от объектов зондирующий сигнал.

Таким образом, после смесителя имеется сигнал на промежуточной частоте 4 ГГц, в котором присутствуют разностные частоты (частоты биения), связанные с задержкой отраженных зондирующих сигналов по отношению к сигналу гетеродина. Далее сигнал усиливается и поступает на смеситель, который переносит его на нулевую частоту. Сигналы 2 и 4 ГГц формируются от одного опорного источника с помощью синтезатора.

Такой измерительный комплекс обладает следующими характеристиками:

- диапазон частот 29–31,2 ГГц;
- девиация частоты до 500 МГц;
- выходная мощность 15 дБм;
- коэффициент шума приемника 8 дБ;
- огибающая ЛЧМ – пилообразные импульсы с частотой 1 кГц;
- коэффициент усиления рупорной антенны 10 дБ.

Исходя из этого, были достигнуты следующие основные параметры измерительного комплекса:

- дальность измерения 3 км;
- разрешение по времени задержки (дальности) 5 нс (0,75 м) в диапазоне задержек  $25 \text{ нс} < \tau_3 < 50 \text{ мкс}$ .

Для исследования сигнала и процесса обработки выполнялась программная имитация. Масштабируемая имитация сигнала производилась в среде LabView со следующими параметрами:

- частота дискретизации  $f_d = 100 \text{ МГц}$ ;
- время наблюдения  $t_n = 20 \text{ мс}$ ;
- диапазон изменения частот 6–26 МГц ( $f_{\text{дев}} = 20 \cdot 10^6 \text{ Гц}$ );
- огибающая ЛЧМ – несимметричные пилообразные импульсы  $f_{\text{п}} = 1 \text{ кГц}$ ;
- также в огибающую ЛЧМ введены небольшие искажения – прохождение через фильтр нижних частот с частотой среза 800 кГц;
- количество отсчетов  $2 \cdot 10^6$ .

Зависимость времени распространения сигнала  $t_3$  от частоты биения  $f_6$  определяется формулой:

$$t_3 = \frac{f_6}{f_{\text{п}} \cdot f_{\text{дев}}}, \quad (1)$$

Для приведенных выше значений  $t_3 = 5 \cdot 10^{-11} \cdot f_6$ . Такое невысокое разрешение по времени задержки обусловлено малым изменением

частоты в сигнале, так как реальные частоты (до 500 МГц) потребовали бы значительно большей частоты дискретизации, что при таком же времени наблюдения значительно бы усложнило процесс имитации сигналов.

На рисунке 2 представлен графики, на котором упрощенно показаны излученный сигнал и принятый сигнал (рисунок 2а), а также их разностная частота (рисунок 2б).

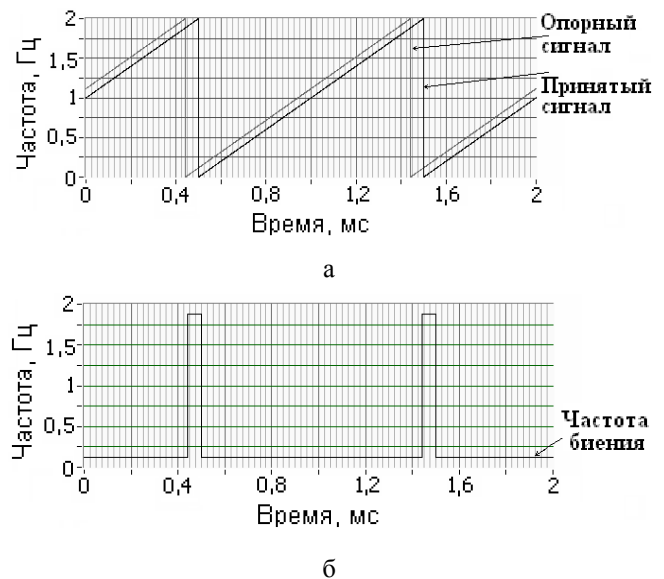


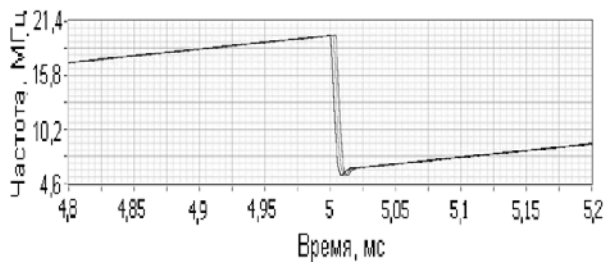
Рисунок 2 – Временные зависимости: а – принятого и опорного сигнала измерительного комплекса; б – разностной частоты приемника

При переключении частоты приемника с максимальной на минимальную возникают переходные процессы, которые дают скачки частоты (рисунок 2б). Такие скачки могут обогатить спектр и ухудшить характеристики приемника при отражении сигнала от нескольких препятствий (целей). Время задержки отраженного сигнала определяется по частоте биений  $f_6$  (рисунок 2б) при известной девиации частоты (1).

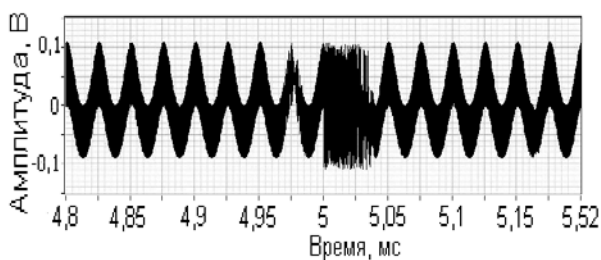
Результаты моделирования показаны на рисунках 3–8. На рисунке 3а показаны временные зависимости изменения частот при приеме трех лучей сигнала с различными значениями мощности и времени задержки каждого луча.

На рисунке 3б представлена временная зависимость сигнала промежуточной частоты при наличии на входе приемного устройства трех лучей с различными значениями времени задержки и разностью амплитуд 20 дБ. Из рисунка 3б видно, что в моменты времени окончания одного периода формирования сиг-

нала с ЛЧМ и начале второго периода временные характеристики изменяются, что приводит к большому уровню боковых лепестков корреляционной функции сигнала с ЛЧМ. Спектр сигнала показан на рисунке 4. Два отсчета дальности имеют разность частот 40 кГц, что согласно формуле (1) составляет время задержки 2 мкс. Видно, что отношение сигнал/помеха для спектральной составляющей сигнала с минимальной мощностью составляет около 18 дБ.



а



б

Рисунок 3 – Временные зависимости: а – изменения частот трех лучей на входе приемного устройства; б – сигнала промежуточной частоты при наличии трех лучей на входе приемного устройства

Для уменьшения уровня боковых лепестков корреляционной функции используем оконную функцию Хэмминга. Временная зависимость сигнала промежуточной частоты при приеме трех лучей и использовании оконной функции Хэмминга показана на рисунке 5. Из рисунка видно, что амплитуда сигнала равна нулю в моменты окончания периода формирования сигнала с ЛЧМ, что приводит к уменьшению уровня боковых лепестков на 13–14 дБ (рисунок 6).

Спектр этого сигнала приведен на рисунке 4. На спектре видны две отметки дальности с различной амплитудой и наличие мешающих сигналов возле более сильного сигнала, которые возникают по уровню примерно на 25–27 дБ меньше уровня сигнала.

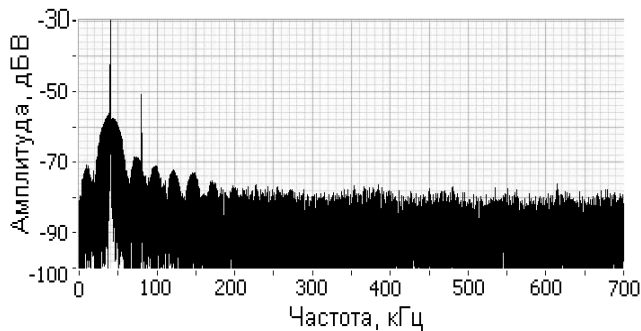


Рисунок 4 – Спектр сигнала промежуточной частоты при наличии трех лучей на входе приемного устройства

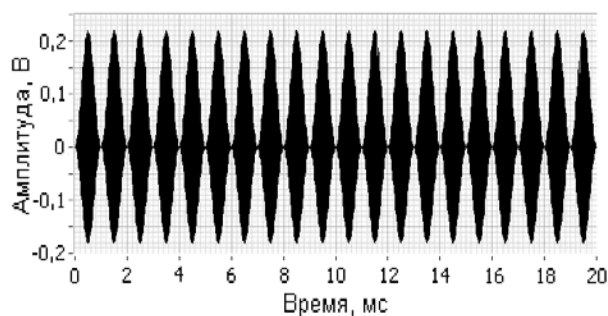


Рисунок 5 – Временная зависимость сигнала промежуточной частоты при приеме трех лучей и использовании оконной функции Хэмминга

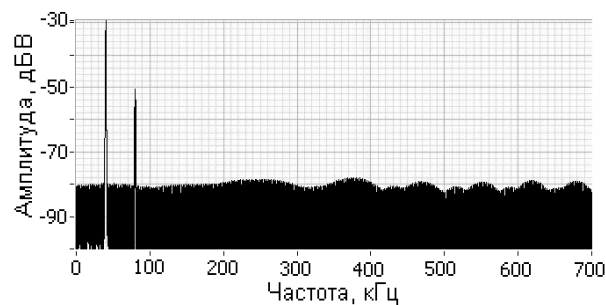
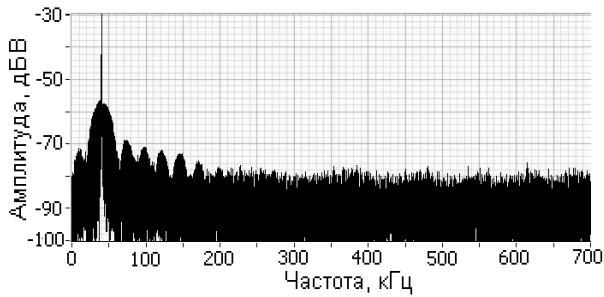
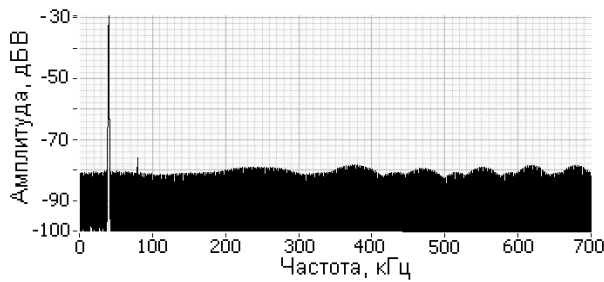


Рисунок 6 – Спектр сигнала промежуточной частоты при приеме трех лучей и использовании оконной функции Хэмминга

На рисунке 7 приведены спектры сигналов при уменьшении мощности сигнала в одном из лучей на 25 дБ. Из рисунка 7а видно, что большой уровень боковых лепестков корреляционной функции сигнала с ЛЧМ не позволяет выделить сигнал луча с такой малой мощностью. Применение оконной функции позволяет выделить и измерить мощность и время задержки третьего луча по отношению к основному лучу (рисунок 7б).

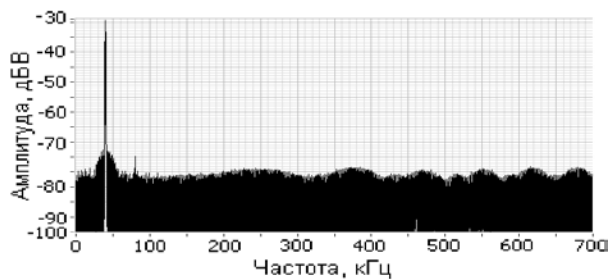


а

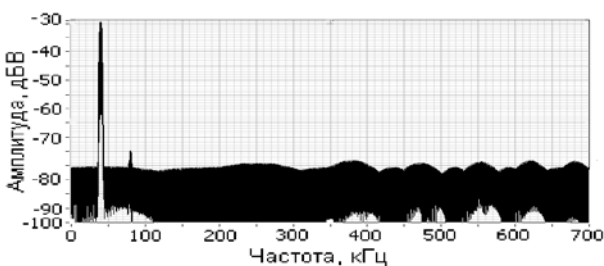


б

Рисунок 7 – Спектр промежуточной частоты сигнала от двух препятствий (разница амплитуды 45 дБ): а – без обработки; б – с обработкой функцией Хемминга



а



б

Рисунок 8 – Спектр сигнала при использовании окна: а – Хемминга; б – с плоской вершиной

Спектры этого же сигнала при обработке его окнами Хемминга и окном с плоской вершиной показаны на рисунке 8 (а и б соответственно).

Моделирования различных оконных функций показало, что в разрабатываемом устройстве наилучшие результаты обеспечиваются при использовании окна Хемминга.

### Заключение

Предложена схема комплекса для измерения профиля временного рассеяния с высоким разрешением по времени, основанная на применении широкополосных сигналов с ЛЧМ, и метод обработки сигнала.

Показано, что для уменьшения уровня боковых лепестков корреляционной функции сигнала с ЛЧМ в разработанном измерительном комплексе целесообразно использовать оконную функцию Хемминга. Это позволяет значительно повысить вероятность раздельного распознавания нескольких сигналов с небольшой разницей времени задержки, но с различной амплитудой отраженного сигнала, что позволяет получить более точные измерения обратного рассеивания, а также повысить надежность работы.

В настоящее время проводятся экспериментальные исследования в реальных условиях многолучевого распространения сигнала.

### Список использованных источников

1. Гавриленко, В.Г. Распространение радиоволн в современных системах мобильной связи / В.Г. Гавриленко, В.А. Яшнов // НГУ им. Лобачевского. – 2003. – С.16–17.
2. Томаси, У. Электронные системы связи / У. Томаси. – М. : Техносфера, 2007. – С. 719–720.
3. Дулевич, В.Е. Теоретические основы радиолокации / В.Е. Дулевич, А.А. Коростелев, Ю.А. Мельник [и др.]; под ред. В.П. Федосева. – М. : Сов. Радио, 1974. – С. 117–118.

Murav'iov V.V., Naumovich N.M., Korenevsky S.A., Stanul A.A.

**Device for measuring temporal characteristics of millimeter-length radiowaves scattered under multipath propagation.**

Possibility of temporal characteristics of scattered radiosignals under multipath propagation was analyzed. A scheme of millimeter-length radiowaves transceiver was presented. The feasibility of “window” function using for processing of received signal was shown based on the modelling of the measuring system operation. (E-mail: Comrad-1@mail.ru)

**Key words:** temporal characteristics, multipath propagation.

*Поступила в редакцию 16.03.2012.*