

УДК 621.371:551.5

Е.П. Ворошилин, В.Ю. Лебедев

Экспериментальная оценка импульсной реакции канала распространения радиоволн в сантиметровом диапазоне

Экспериментально оценивается импульсная характеристика канала распространения радиоволн. Приводятся оценки импульсных характеристик для приземных трасс различных типов при различных угловых положениях направленной передающей антенны.

Ключевые слова: экспериментальные данные, импульсная характеристика, многолучевость, фильтр Винера.

Искажения сигналов, вызванные многолучевостью распространения, приводят к значительным погрешностям оценок их параметров. Таким образом, многолучевость канала распространения радиоволн (РРВ) существенно влияет на качество радиотехнической системы. Характер многолучевости распространения (количество путей, задержки и множители ослабления и т.д.) на приземных трассах в основном определяется отражательной способностью подстилающей поверхности и находящихся на ней объектов, а также взаимной ориентацией диаграмм направленности (ДН) передающей и приемной антенн [1]. Наиболее наглядно характер многолучевости отражает импульсная реакция канала $h(\tau)$. Под импульсной характеристикой канала РРВ понимается реакция канала на входной сигнал вида $\delta(t)$ (где $\delta(t)$ – функция Дирака). Для многолучевого канала РРВ $h(\tau)$ обычно записывают в виде

$$h(\tau) = \sum_{i=1}^N a_i \cdot \delta(\tau_i),$$

где N – количество лучей, по которым сигнал приходит в точку наблюдения; a_i – весовой коэффициент, соответствующий i -му лучу; τ_i – временная задержка i -го луча относительно момента прихода прямого сигнала.

Использование импульсной характеристики для описания канала РРВ предполагает, что он представляется линейной электрической цепью. Сигнал на выходе линейной цепи $s_{\text{вых}}(t)$ равен свертке входного сигнала $s_{\text{вх}}(t)$ с импульсной характеристикой $h(\tau)$. Запишем:

$$s_{\text{вых}}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) s_{\text{вх}}(t - \tau) d\tau,$$

где $s_{\text{вых}}(t)$ – принятый сигнал; $s_{\text{вх}}(t)$ – излученный сигнал; $h(\tau)$ – импульсная характеристика канала РРВ, включающая в себя передающую и приемную антенны.

В пассивной радиолокации типична ситуация, когда источник излучения является остронаправленным. При этом направление излучения очень редко совпадает с направлением на приемную антенну. К сожалению, исследований влияния направления излучения на импульсную реакцию канала РРВ на приземных трассах в литературе авторами не найдено.

С целью экспериментального исследования импульсной реакции приземного канала РРВ сантиметрового диапазона был разработан комплекс приемопередающей аппаратуры с синхронизированными с точностью до 3 нс моментами передачи и приема сигналов. Источником излучения являлся радиопередающий комплекс (РПК-1), генерирующий радиоимпульсы мощностью 200 кВт и длительностью 250 нс по уровню –3 дБ с частотой повторения 2 кГц на несущей частоте 9000 МГц. Экспериментальные данные представляли собой синхронизированные с моментом излучения записи квадратур сигнала на выходе приемника с полосой пропускания 30 МГц. За время одного сеанса записывалось от 1000 до 15000 сигналов. В источнике излучения использовалась параболическая антенна с шириной ДН 1,5°, а в приемнике – рупорная антенна с шириной ДН 15°. Излучающая антенна вращалась в азимутальной плоскости с периодом 52 с. Приемная антенна была наведена на источник излучения по максимуму сигнала. Отношение сигнал/шум в главном лепестке ДН излучающей антенны во всех реализациях составляло не менее 48 дБ. ДН передающей антенны и огибающая сигнала в главном лепестке диаграммы направленности (ЛДН), записанные на трассе прямой видимости приведены на рис. 1.

Доклады ТУСУРа, № 2 (18), часть 2, декабрь 2008

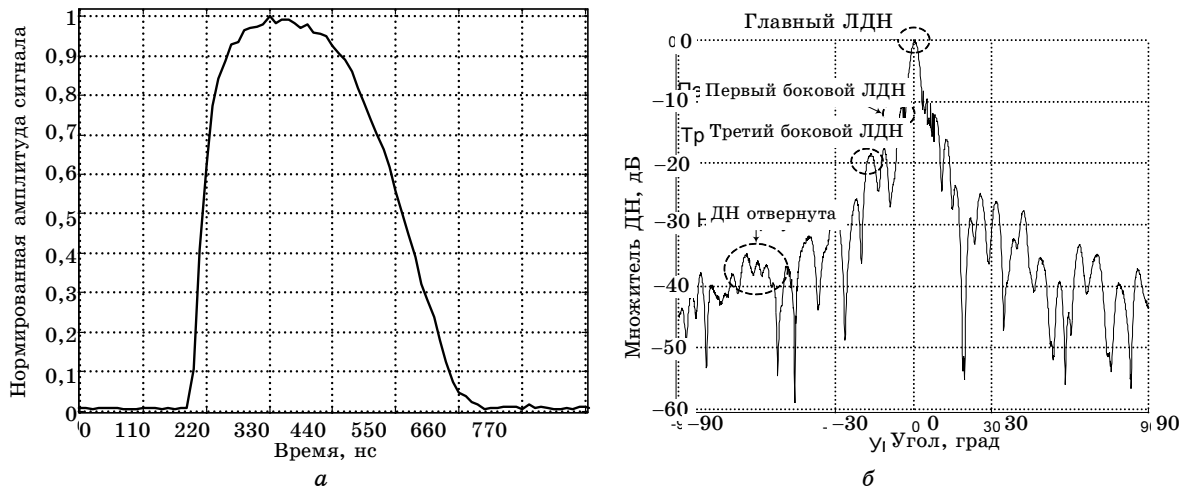


Рис. 1. Огибающая сигнала, принятого в главном ЛДН передающей антенны (а); диаграмма направленности передающей антенны (б)

С использованием описанной аппаратуры были проведены трассовые измерения в период 2006–2007 гг. В измерениях были задействованы три трассы.

Прямоугольные координаты в системе Гаусса–Крюгера импульсного источника радиоизлучения РПК-1 и приемного пункта, располагавшегося на полигоне НИИ РТС ТУСУР, приведены в таблице.

Параметры исследуемых трасс

Трасса	Протяженность, км	Тип трассы	Координаты приемника	Координаты передатчика
№ 1	16,68	Закрытая	X: 6252834,8 Y: 15374069,5	X: 6241810,4 Y: 15361543,5
№ 2	16,39	Закрытая	X: 6252834,8 Y: 15374069,5	X: 6241989,4 Y: 15361775,4
№ 3	28,98	Закрытая	X: 6252834,8 Y: 15374069,5	X: 6235516,2 Y: 1530828,4

Топографическая привязка приемных и передающих установок к местности проводилась с помощью двухчастотного GPS приемника Z-12. Записанные в каждой точке привязки «сырые» данные сигналов спутниковой радионавигационной системы (СРНС) обрабатывались с помощью программного обеспечения «Prism» фирмы Ashtech, позволяющего рассчитывать координаты и взаимное расположение измеряемых точек. Профили трасс с учетом высоты леса представлены на рис. 2–4.

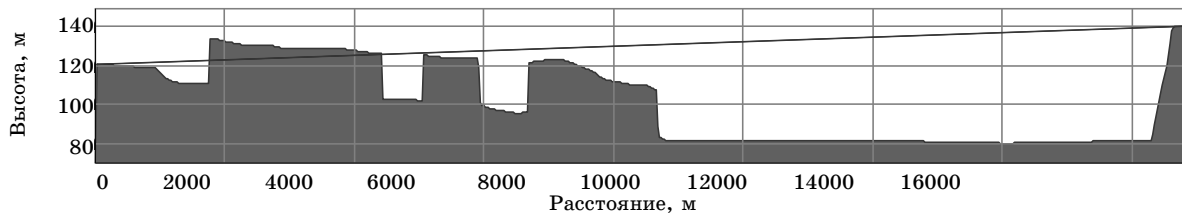


Рис. 2. Профиль трассы № 3 Кандинка – полигон

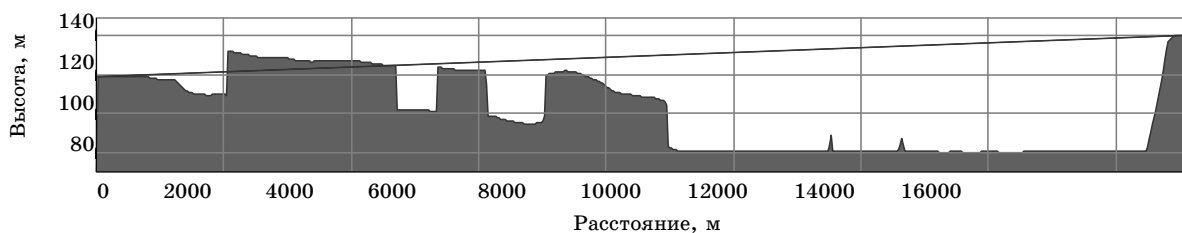


Рис. 3. Профиль трассы № 0 Кандинка – полигон

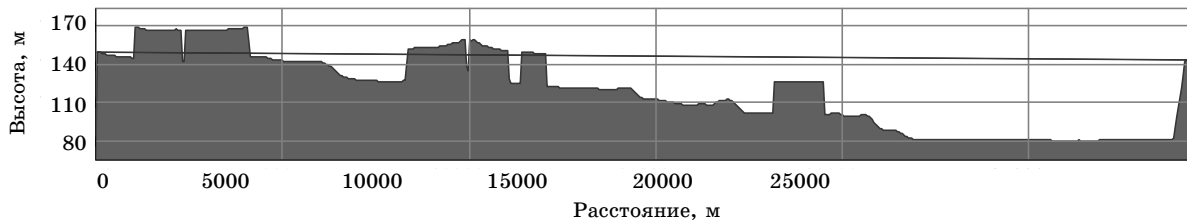


Рис. 4. Профиль трассы Малые Ключи – полигон

Оценка импульсной реакции канала РРВ эквивалентна задаче оценки частотной передаточной функции линейной системы, которая может быть решена с применением фильтра Винера [2]. При проектировании этого фильтра ставится задача нахождения такой линейной оценки импульсной характеристики системы

$$\hat{h}(t) = L[s_{\text{пр}}(t)],$$

где L – линейный оператор; $s_{\text{пр}}(t)$ – сигнал на выходе системы, что $M\{[h(t) - \hat{h}(t)]^2\}$ имеет минимальную величину.

Структура устройства для получения оценок была найдена многими исследователями и сводится к фильтру с передаточной функцией [2]:

$$H(j\omega) = \frac{S_{\text{вх}}^*(j\omega)}{|S_{\text{вх}}(j\omega)|^2 + \frac{|N(j\omega)|^2}{|S_{\text{вх}}(j\omega)|^2}}, \tag{1}$$

где $S_{\text{вх}}(j\omega)$ – нормированный спектр излучаемого сигнала; $|N(j\omega)|^2$ – энергетический спектр шума.

Тогда оптимальная оценка передаточной функции канала РРВ приобретает вид

$$\hat{K}(j\omega) = H(j\omega) \cdot S_{\text{вых}}(j\omega),$$

где $S_{\text{вых}}(j\omega)$ – спектр принимаемого сигнала.

В работе оценка импульсной характеристики системы находится путем вычисления обратного преобразования Фурье от $\hat{K}(j\omega)$:

$$\hat{h}(\tau) = F^{-1}[\hat{K}(j\omega)]. \tag{2}$$

Оценка импульсной реакции канала производилась путем усреднения оценок (2), полученных по каждой реализации принятого сигнала.

Оценки импульсной характеристики канала РРВ для трасс № 1 и № 2 протяженностью 16,68 и 16,39 км изображены на рис. 5. По оси ОХ отложено время в тактах АЦП. Период дискретизации АЦП был равен 11 нс.

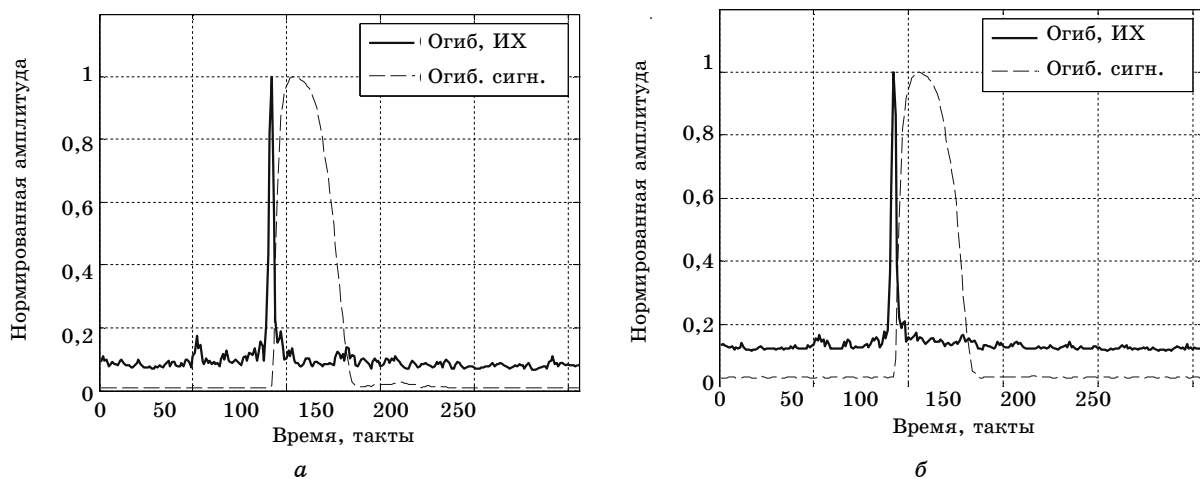


Рис. 5 (начало). Оценки импульсных характеристик двух каналов РРВ: а – трасса № 1, прием по главному лепестку ДН; б – трасса № 2, прием по главному лепестку ДН

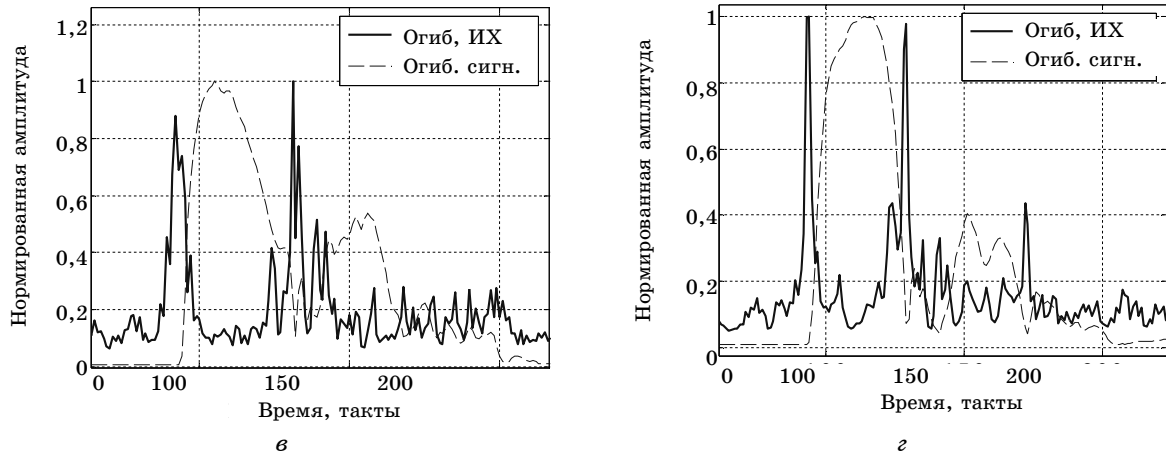


Рис. 5 (окончание). Оценки импульсных характеристик двух каналов РРВ:
 б – трасса № 1, прием по боковому лепестку ДН; з – трасса № 2, прием по боковому лепестку ДН

Для трассы № 3 протяженностью 29 км удалось получить оценки импульсной характеристики в главном лепестке ДН источника излучения для двух случаев ориентации главного лепестка ДН источника излучения в вертикальной плоскости (0 и 3 град). Соответствующие оценки приведены на рис. 6.

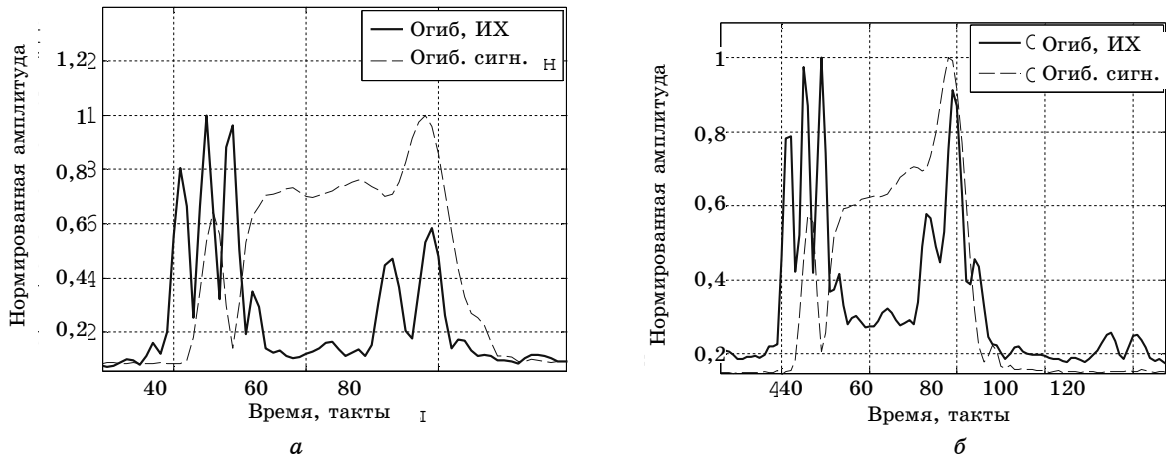


Рис. 6. Оценки импульсных характеристик двух каналов РРВ:
 а – трасса № 3, угол места 0 град; б – трасса № 3, угол места 3 град

Для трассы № 3 были получены оценки импульсной характеристики канала РРВ при приеме по левому и правому боковым лепесткам ДН источника излучения (левый (-3...-10)° и правый (3...10)°). Соответствующие зависимости приведены на рис. 7.

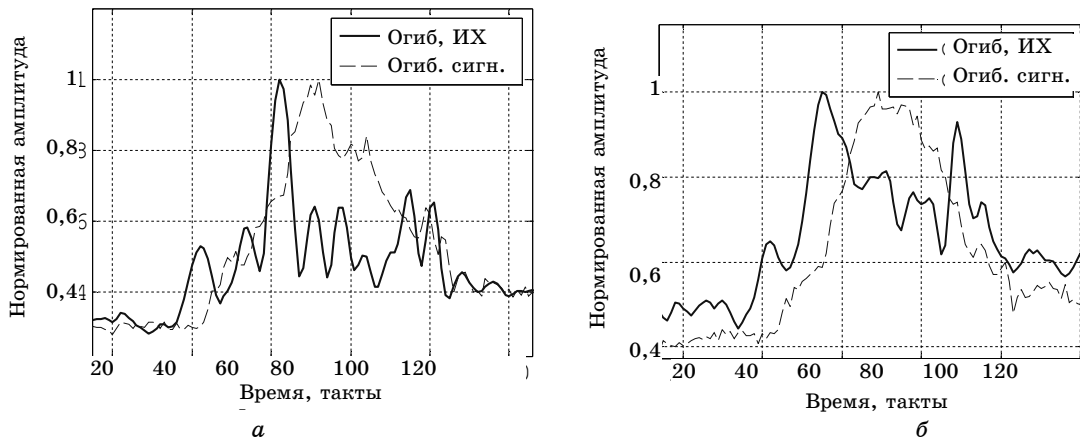


Рис. 7. Оценки импульсных характеристик двух каналов РРВ:
 а – в левом боковом лепестке (-3...-10)°; б – в правом боковом лепестке (3...10)°

Из рис. 5–7 следует:

– На трассе № 1, 2 при ориентации ДН источника излучения на приемник имеет место преимущественно однолучевое распространение (мощность отражений в точке приема сравнима с мощностью шума приемника).

– На трассах № 1, 2 при работе по боковому излучению источника имеет место многолучевое распространение (появляются отраженные сигналы, мощность которых сравнима с мощностью прямого сигнала).

– На трассе № 3 многолучевое распространение зафиксировано в главном лепестке ДН источника излучения.

– На трассе № 3 изменение угла места с 0 до 3 град привело к небольшому перераспределению мощностей прямого и отраженных сигналов в пользу отраженных.

– На трассе № 3 при приеме по боковым лепесткам ДН источника излучения происходит практически полное исчезновение прямого сигнала при достаточно высоком уровне отраженных.

Выводы

Длительность импульсной характеристики зависит от взаимной ориентации ДН источника излучения и точки наблюдения. Она принимает значения от десятков наносекунд (прием по главному лепестку ДН источника излучения) до единиц микросекунд (прием по боковым лепесткам ДН источника излучения). При приеме по главному лепестку ДН источника излучения удельный вес запаздывающих путей распространения на более протяженной трассе № 3 выше, чем на трассах № 1 и 2. Удельный вес запаздывающих путей увеличивается при приеме по боковому лепестку ДН источника излучения (трассы № 1, 2). Это связано с тем, что прямой сигнал испытывает дополнительное ослабление вследствие влияния закрывающего препятствия и малого коэффициента усиления передающей антенны в направлении на точку приема по сравнению с коэффициентом усиления в направлении на отражающий (рассеивающий) объект. В большинстве случаев на рассмотренных трассах момент времени, соответствующий первому пику импульсной характеристики канала РРВ, совпадает с моментом начала прямого сигнала. Данный факт свидетельствует о возможности применения рассмотренного выше метода оценки задержки прямого сигнала на трассе распространения.

Литература

1. Кулемин Г.П. Рассеяние миллиметровых радиоволн поверхностью земли под разными углами / Г.П. Кулемин, В.П. Рассказовский. – Киев: Наукова думка, 1987. – 220 с.
2. Оппенгейм Э. Применение цифровой обработки сигналов. – М.: Мир, 1980. – 550 с.

Ворошилин Евгений Павлович

Аспирант кафедры радиотехнических систем ТУСУРа
Тел.: (3822) 41-38-89
Эл. почта: nvi@sibmail.com

Лебедев Виталий Юрьевич

Канд. техн. наук, ст. науч. сотр. НИИ радиотехнических систем ТУСУРа
Тел.: (3822) 41-38-89

E.P. Voroshilin, V.Y. Lebedev

Experimental estimation of the pulse response of X-band radio wave propagation channel

The experimental evaluation of pulse response of radio wave propagation channel is considered. Estimates of pulse response of the radio wave propagation channel are given for various terrestrial paths and different angular directions of the transmitting antenna.

Key words: experimental data, impulse response, multipath propagation, Wiener filter.