

УДК 621/396/96

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МНОГОЛУЧЕВОСТИ НА ОЦЕНКУ ВРЕМЕНИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МЕТРОВЫХ И ДЕЦИМЕТРОВЫХ РАДИОВОЛН ДЛЯ ЗАДАЧ ВЫСОКОТОЧНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ

И. Е. Антипов

Доктор технических наук, профессор\*

Е. Ю. Бондарь

Младший научный сотрудник\*

\*Кафедра ОРТ

Харьковский национальный университет

радиоэлектроники

пр. Ленина, 14, г. Харьков, Украина, 061011

Контактный тел.: 8 (057) 700-22-84

E-mail: secort@kture.kharkov.ua

*Робота присвячена дослідженню впливу багатопроменевості на оцінку часу поширення радіохвиль в атмосфері. Проаналізовані існуючі моделі багатопроменевого розповсюдження сигналів. Запропонована імітаційна модель, призначена для прогнозування затримок, що виникають унаслідок сумування сигналів в багатопроменевих каналах*

*Ключові слова: синхронізація, час поширення, багатопроменевість*

*Работа посвящена учёту влияния многолучёвости на оценку времени распространения радиоволн в атмосфере. Проанализированы существующие модели многолучевого распространения сигналов. Предложена имитационная модель, предназначенная для прогнозирования задержек, возникающих вследствие сложения сигналов в многолучевых каналах*

*Ключевые слова: синхронизация, времени распространения, многолучевость*

*The work is about the estimation of the propagation time in multipath radiochannel in atmosphere. The existents multipath radio propagation models are analyzed. New imitation model for time delay prediction in case of signals adding in multipath channel is proposed*

*Keywords: synchronization, time of propagation, multipath*

## Введение

Для успешного решения современных научно-технических и военных задач, связанных с высокоточной синхронизацией стандартов времени и частоты требуется уменьшать погрешность их сравнения (сличения) [1]. Высокие темпы совершенствования стандартов (относительная нестабильность современных эталонов составляет  $10^{-13} \dots 10^{-14}$ , а в перспективе –  $10^{-15} \dots 10^{-16}$ ) определяют актуальность задачи повышения точности сличения шкал времени и частоты. Уменьшать погрешность сличения и синхронизации следует за счет учета различных факторов, в том числе, за счет компенсации погрешностей, связанных с многолучевым распространением радиоволн (РРВ).

Таким образом, существует задача оценки времени распространения сигналов из ведущего в ведомый пункт с учётом многолучевых переотражений, возникающих в канале прямой видимости.

## Причины и последствия многолучевого распространения радиоволн

В любых радиотехнических системах, в том числе и в системах высокоточной синхронизации, сигнал в точку приёма может поступать несколькими путями с различным временем задержки. Наличие нескольких путей связано со следующими факторами: с рассеянием радиоволн в атмосфере; с отражением от неодно-

родностей тропосферы; с отражением от препятствий и различных объектов, встречающихся на пути [2].

Задержка  $\Delta t$  одного сигнала относительно другого может быть соизмерима как с длительностью информационной посылки, так и с периодом высокочастотного (несущего) колебания. Кроме того, она в силу множества причин может быть непостоянной.

Если задержка соизмерима с периодом высокочастотного колебания, то её можно считать эквивалентной фазовому сдвигу, и результатом сложения будет усиление или ослабление принимаемого сигнала. При непостоянстве задержки возникают замирания.

Если задержка одного сигнала относительно другого соизмерима с длительностью информационной посылки, то их сложение, наряду с замираниями, приводит к межсимвольной интерференции – нарушению формы модулирующего колебания и искажению информации.

**Модели многолучевого распространения сигналов**

В литературе при изучении многолучевого РРВ, начиная от классических трудов [3] и заканчивая современными научными публикациями, вопросу оценки времени распространения сигналов уделялось недостаточное внимание, так как этот вопрос интересует узкий круг специалистов и потребителей, которые связаны с высокоточными измерениями времени.

В конце прошлого столетия начали бурно развиваться сотовые и другие беспроводные системы связи, в которых время распространения сигналов играет существенную роль. В связи с этим было разработано достаточное количество моделей, в которых наряду с учётом различных факторов, возникающих при распространении радиоволн, была предложена и оценка времени распространения в многолучевом канале.

Рассмотрим модели каналов связи для фиксированных беспроводных сетей, включающие в себя профили временных задержек, обусловленные многолучевым переотражением сигнала, предложенные в стандарте IEEE 802.16.3.

Профиль временных многолучевых задержек для направленных антенн, может быть представлен быстро убывающей показательной функцией [3]. Эту функцию характеризует  $\tau_{rms}$  – среднеквадратический размах полного профиля задержек, определяемый, как:

$$\tau_{rms}^2 = \sum_j P_j \cdot \tau_j - \tau_{avg}^2 ; \quad (1)$$

$$\tau_{avg} = \sum_j P_j \tau_j , \quad (2)$$

где  $\tau_j$  - задержка j-той компоненты профиля задержек,  $P_j$  - мощность j-той компоненты профиля задержек, нормированная по суммарной мощности всех компонент.

Модель профиля временных задержек, обусловленных многолучевостью, представлена в виде быстро убывающей показательной функции:

$$P(\tau) = A\delta(\tau) + B \sum_{i=0}^{\infty} e^{-\frac{i\Delta\tau}{\tau_0}} \delta(\tau - i\Delta\tau) , \quad (3)$$

где  $A$ ,  $B$  и  $\Delta\tau$  - параметры, которые определяются экспериментально, причём,  $A$  – амплитуда луча, пришедшего по прямому пути, остальные параметры, характеризуют задержанные лучи.

Модель задержки распространения, предложенная в [4], основана на большом количестве экспериментальных данных. В ней определено, что среднеквадратическое отклонение задержки подчинено логнормальному распределению, и что медиана этого распределения растёт как показатель степени от расстояния. Модель, разработанная для сельской, пригородной, городской и гористой местностей, имеет следующий вид:

$$\tau_{rms} = T_1 d^\epsilon y \quad (4)$$

где  $\tau_{rms}$  - среднеквадратическое отклонение задержки распространения;  $d$  – расстояние между антеннами, км;  $T_1$  – значение медианы для  $\tau_{rms}$  (для  $d = 1$  км);  $\epsilon$  – показатель степени, величина которого лежит в пределах 0,5-1,0;  $y$  – случайная величина, подчиненная логнормальному закону распределения.

Следует помнить, что данные модели наиболее широко применяются для определения потерь и прогнозирования уровня сигнала. Например, модель Хата - Окамура действительна для диапазона частот 500...1500 МГц, для расстояния от базовой станции до приемника от 1...50 км и высоты антенны базовой станции не больше чем 30 м. Однако, в нашей задаче используются другие частоты, а именно диапазон метровых и дециметровых волн; расстояния, превышающие 50 км; высоты антенн также могут отличаться.

В общем виде модель многолучевого канала представлена на рис. 1. Если предположить, что передатчик излучает гармонический сигнал  $y_{вх} = A \sin 2\pi\omega t$  с частотой несущей  $\omega$  и амплитудой  $A$ , то в приёмнике будет получен сигнал  $y_{вых} = \sum_{i=1}^N A_i \sin 2\pi\omega(t - t_i)$ , где  $t_i$  - задержка распространения сигнала по i-му пути.

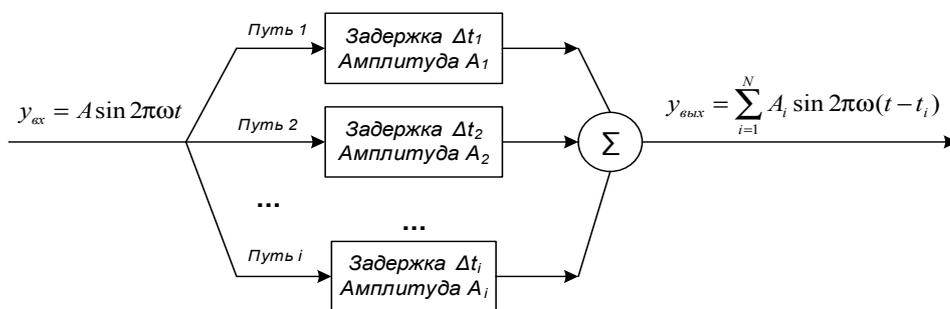


Рис. 1. Модель многолучевого распространения сигнала

**Влияние многолучевого РРВ на оценку времени задержки сигналов**

Для достижения потенциальной точности оценки временного положения сигналов следует применять согласованную фильтрацию или корреляционную об-

работку [5]. По этой причине в нашей задаче определение временного положения сигнала осуществляется методом корреляционной обработки.

В простейшем случае однолучевого распространения после корреляционной обработки на выходе коррелятора имеем автокорреляционную функцию (АКФ) этого сигнала. Для более сложного случая двухлучевого сигнала получается следующее выражение:

$$\begin{aligned}
 R_3(\tau) &= \int_{-\infty}^{\infty} \{S(t) + A \cdot S(t - t_3)\} S(t - \tau) dt = \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} S(t) S(t - \tau) dt + A \int_{-\infty}^{\infty} S(t - t_3) S(t - \tau) dt = \\
 &= R(\tau) + AR(\tau + t_3)
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Из (5) видно, что корреляционная функция многолучевого сигнала есть не что иное, как сумма автокорреляционной функции этого сигнала и корреляционной функции, которая имеет свои значения амплитуды и дополнительно зависит от временных задержек, вносимых переотраженными лучами. Следует помнить, что при приёме реальных сигналов неизвестно, сколько именно лучей и с какими задержками складываются, а решение о времени запаздывания необходимо принимать по имеющейся реализации на выходе корреляционного устройства.

Можно выделить два механизма влияния многолучёвости на измерение времени распространения. Во-первых, это изменение амплитуды принимаемого сигнала вызванное замираниями, которое сопровождается соответствующим изменением отношения сигнал/шум. Во-вторых, искажение формы принимаемого сигнала, и, как следствие, искажение его корреляционной функции, по которой и определяется временное положение принимаемого сигнала.

Влияние шума на погрешность измерения временного положения сигнала описывается формулой

$$\sigma_t = \frac{1}{q \cdot \Delta\omega_{эф}}, \tag{6}$$

где  $q = \sqrt{\frac{2\mathcal{E}}{N_0}}$  - соотношение сигнал/шум при согласованной обработке сигнала;  $\mathcal{E}$  - энергия сигнала;  $N_0$  - спектральная плотность шума;  $\Delta\omega_{эф}$  - эффективная ширина спектра.

При моделировании данное обстоятельство следует учесть, предположив, что закон распределения амплитуды суммарного многолучевого сигнала соответствует закону Релея - Райса, который определяется следующей зависимостью:

$$W(\rho, \alpha, \sigma) = \frac{\rho}{\sigma^2} \cdot \exp\left[-\frac{\rho^2 + \alpha^2}{2 \cdot \sigma^2}\right] \cdot I_0\left(\frac{\alpha \cdot \rho}{\sigma^2}\right), \rho > 0, \tag{7}$$

где  $I_0$  - модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка;  $\alpha$  - амплитуда прямого сигнала, её считаем детерминированной, не подверженной случайным флуктуациям;  $\sigma$  - среднеквадратичная величина амплитуды отраженного сигнала;  $\rho$  - величина амплитуды суммарного сигнала. Равенство  $\sigma = 0$  соответствует отсутствию отраженного сигнала. Примеры распределения Релея - Райса для нескольких значений

параметров амплитуда прямого сигнала и среднеквадратичной величины амплитуды отраженного сигнала представлены на рис. 2. Равенство  $\sigma = 0$  соответствует отсутствию отраженного сигнала, а равенство  $\alpha = 0$  описывает случай отсутствия прямого сигнала.

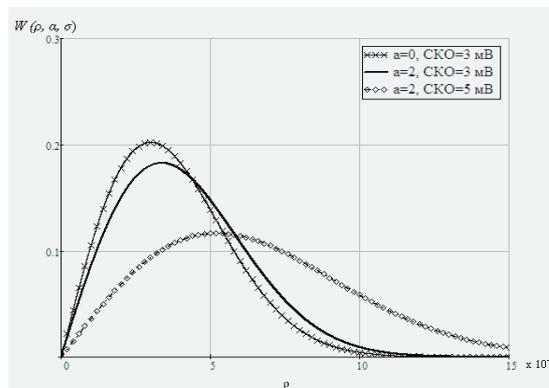


Рис. 2. Распределение Релея – Райса для амплитуд многолучевого сигнала

Искажение формы сигнала при небольшом времени запаздывания приводит к ошибке определения его истинного временного положения. Механизм возникновения ошибки на примере прямоугольного сигнала иллюстрируется рис. 3.

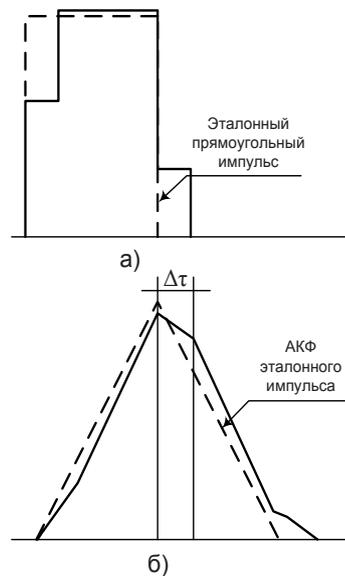


Рис. 3. а) – эталонный импульс и импульс, прошедший многолучевой канал; б) – АКФ эталонного и ВКФ многолучевого импульсов

Расчёт, сделанный для этого сигнала с длительность  $T_0$  при наличии двух составляющих - основной с амплитудой  $A_1$  и задержанной на время  $t_3$  с амплитудой  $A_2$ , показывает, что ошибка в определении медианного значения корреляционной функции может составлять до 49,9 % его длительности.

Результаты расчёта в процентах для различных соотношений временной задержки к длительности сигнала, а также для различных соотношений задержанной и прямой составляющих сигнала представлены и на рис. 4 и в табл. 1.

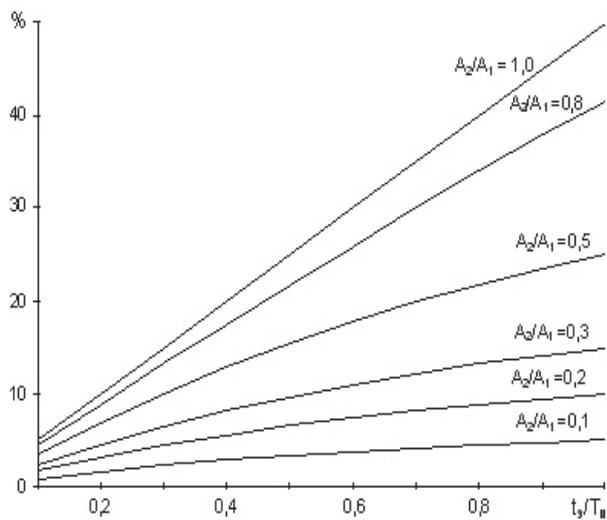


Рис. 4. Смещение медианного значения корреляционной функции для прямоугольного импульса

В случаях особенно больших задержек, превышающих длительность сигнала, может иметь место возникновение нескольких максимумов корреляционной функции и, как следствие, ещё большая неоднозначность, а то и невозможность определения временного положения сигнала.

Учёт влияния многолучевого распространения на оценку временного положения корреляционной функции сложных (составных) сигналов анализировать в общем виде достаточно затруднительно.

Дополнительное усложнение расчётов происходит при наличии более чем двух задержанных составляющих в сумме сигналов. Поэтому для дальнейшего анализа влияния многолучевого РРВ следует применять численное моделирование для определённого (априорно известного) сигнала. Что же касается модели РРВ, то необходима либо модель конкретной многолучевой трассы со всеми известными параметрами  $A, B, \pm \gamma, \chi$ , либо имитационная модель, позволяющая устанавливать эти параметры в соответствии с законами распределения (1-4), (7).

Таблица 1

Относительное смещение медианного значения корреляционной функции при наличии задержанного луча, %

$t_3/T_{II}$ $A_2/A_1$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
0,1	0,85	1,65	2,35	2,95	3,55	3,95	4,35	4,65	4,8	4,9
0,2	1,55	3,1	4,45	5,75	6,85	7,85	8,7	9,35	9,9	10,1
0,3	2,25	4,35	6,45	8,35	10,0	11,5	12,9	14,0	14,95	15,5
0,4	2,88	5,6	8,1	10,6	12,83	14,95	16,85	18,5	19,8	20,95
0,5	3,25	6,55	9,55	12,6	15,3	18,05	20,5	22,8	24,75	26,3
0,6	3,65	7,35	10,87	14,32	17,69	20,9	23,97	26,8	29,3	31,85
0,7	4,05	8,1	12,05	15,95	19,85	23,5	27,1	30,5	33,8	36,95
0,8	4,35	8,75	13,15	17,45	21,7	25,85	29,95	33,95	37,8	41,5
0,9	4,7	9,4	14,05	18,75	23,4	27,95	32,5	37,05	41,75	45,9
1,0	4,95	9,95	14,95	20,0	25,0	30,0	34,9	39,85	44,85	49,9

**Имитационная модель для оценки времени задержки сигналов**

Было разработано и протестировано специализированное программное обеспечение, выполняющее вычисление смещения максимума корреляционной

функции исследуемого многолучевого сигнала с возможностью учета влияния шума. Такой расчет может проводиться для множества реализаций (до 1000 единичных измерений) любого предварительно заданного сигнала. Окно программы с одним из возможных режимов работы представлено на рис. 5.

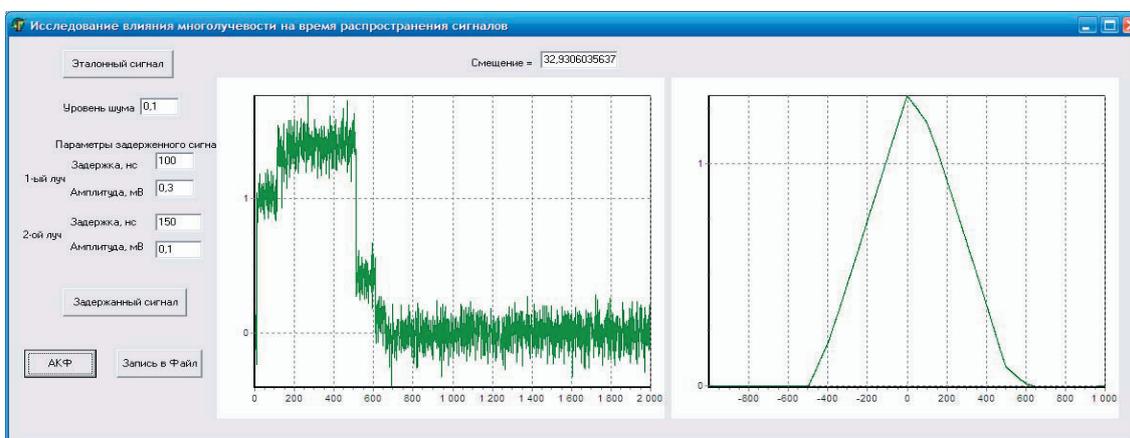


Рис. 5. Рабочее окно программы

На первом этапе для исследований влияния многолучевости на время распространения в качестве сигнала для численного моделирования был выбран прямоугольный видеоимпульс.

По результатам моделирования были построены распределения ожидаемого смещения максимума ВКФ  $\Delta\tau$ , которое подчинено нормальному закону.

На рис. 6 приведен вариант расчета  $\Delta\tau$  для заданных параметров двух переотраженных лучей, где математическое ожидание и дисперсия смещения максимума ВКФ составляют 32 нс и 2 нс соответственно.

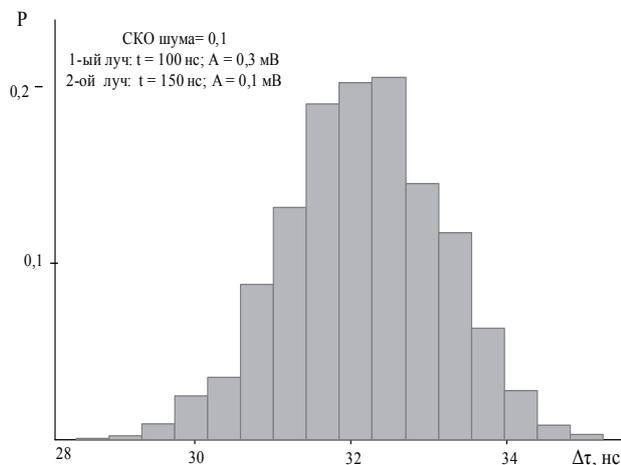


Рис. 6. Распределение смещения максимума ВКФ при многолучевом распространении

### Выводы

Для высокоточной синхронизации, когда речь идет о погрешности измерения сдвига шкал в единицы наносекунд, необходимо учитывать и компенсировать погрешность измерения временного положе-

ния, вызванную многолучевыми переотражениями сигнала в канале прямой видимости. На примере прямоугольного импульса показано, что такая составляющая погрешности может иметь значение до 50% от длительности сигнала. Для точного определения этой составляющей погрешности следует использовать либо имитационное моделирование, или же основываться на экспериментальных данных для конкретной трассы.

### Литература

1. Палий, Г.Н. Синхронизация высокочастотных мер времени и частоты / Г. Н. Палий, Е. В. Артемьева ; Изд-во стандартов, 1976. - 168 с.
2. Черный, Ф. Б. Распространение радиоволн / Ф. Б. Черный. - Изд. 2-ое, доп. и переработ. - М. : «Сов. радио», 1972. - 464 с.
3. Альперт, Я. Л. Распространение радиоволн / Я. Л. Альперт, В. Л. Гинзбург, Е. Л. Фейнберг ; Москва : Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1953.- 870 с.
4. L.J. Greenstein, V. Erceg, Y.S. Yeh, and M.V. Clark, "A new path-gain/delay-spread propagation model for digital cellular channels," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 46, no. 2, May 1997.
5. Антипов, И. Е. Развитие теории и совершенствование радиометeorных систем связи и синхронизации / И. Е. Антипов, Ю. А. Коваль, В. В. Обельченко ; Харьков: Коллегиум, 2006.- 308 с.