

Модели искажений цифровых сигналов при распространении в лесах

Л.Е. Назаров

*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им В.А. Котельникова РАН, 41190, Фрязино Московской обл., пл Введенского, 1.
E-mail: leynaz2018@mail.ru*

Приведены модели линий распространения сигналов в лесах, основанные на их представлении в виде квазиоднородной среды с эффективной комплексной диэлектрической проницаемостью. Произведено моделирование распространения цифровых сигналов с использованием этих моделей при распространении в лесах с типичными характеристиками с целью оценивания вероятностных характеристик приема цифровых сигналов с расширением частотной полосы. Показано, что для класса цифровых сигналов с фазовой манипуляцией и с центральной частотой P-диапазона с горизонтальной поляризацией энергетические потери по отношению к распространению в свободном пространстве с эквивалентным затуханием достигают 1.5-3.5 дБ.

Ключевые слова: цифровые сигналы, лесные массивы, модели искажений, диэлектрическая проницаемость, энергетические потери.

Models of digital signal distortions during propagation in forests

L.E. Nazarov

Fryazino branch of the Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS.

Models of signal propagation lines in forests based on their representation as a quasi-homogeneous medium with an effective complex permittivity are presented. Modeling of the propagation of digital signals using these models during propagation in forests with typical characteristics was carried out in order to evaluate the probabilistic characteristics of the reception of digital signals with the frequency band extension. It is shown that for the class of digital signals with phase shift keying and with the center frequency of the P-band with horizontal polarization, the energy losses in relation to propagation in free space with equivalent attenuation reach 1.5-3.5 dB.

Keywords: digital signals, forest areas, distortion models, dielectric constant, energy losses

Введение

Проблемы развития моделей распространения радиоволн в лесах являются важными при создании беспроводных информационных систем различного назначения, для систем дистанционного зондирования Земли [1,2].

Развитию моделей распространения сигналов в лесах с учетом многократного рассеяния и затухания посвящено достаточно большое количество работ, в которых оцениваются коэффициенты затухания сигналов [1-3]. При разработке моделей распространения электромагнитных волн в лесах лесные массивы представляются в виде квазиоднородной диэлектрической среды с эффективной относительной комплексной диэлектрической проницаемостью $\hat{\epsilon}_m$ [1,2].

Распространение по оси z плоской волны с частотой f , падающей нормально на изотропную среду с диэлектрической проницаемостью $\hat{\epsilon}(z, f)$, задается решением волнового уравнения относительно комплексной амплитуды электрического поля $\hat{E}(z, f)$, приближение геометрической оптики имеет вид [1]

$$\dot{E}(z, f) = \dot{E}(0, f) \exp\left(-\frac{j2\pi f}{c} \int_0^z \dot{n}(x, f) dx\right). \quad (1)$$

Здесь c - скорость света в свободном пространстве; $\dot{n}(x, f) = \sqrt{\dot{\epsilon}(x, f)}$ - коэффициент преломления среды, полагая ее немагнитной; $\dot{E}(0, f) = \dot{E}_0(0, f) \dot{G}(f)$; $\dot{G}(f)$ - коэффициент передачи Френеля для граничащих сред; $\dot{E}(0, f)$ - комплексная амплитуда падающей волны на границе раздела сред.

Для цифровых сигналов задача усложняется - сигналы представляются суммой монохроматических составляющих, каждая из которых приобретает частное фазовое и амплитудное смещения за счет дисперсионных и поглощающих свойств лесов, что определяет искажение комплексной огибающей сигналов и возникновение интерференционных межсимвольных и межканальных помех в дополнение к канальным тепловым шумам [4,5].

Цель работы - дать описания моделей радиолиний распространения сигналов в лесных массивах, оценить вероятностные характеристики приема ряда цифровых сигналов [4] при использовании этих моделей.

Модели радиолиний распространения сигналов в лесных массивах

Модели распространения сигналов в лесах основаны на их представлении в виде основной среды - атмосферы и элементов лесной растительности [2]. Данные представления являются основанием для различных приближений при создании и развитии моделей лесных массивов, например, в виде квазиоднородной среды, характеризуемой эффективной относительной комплексной диэлектрической проницаемостью $\dot{\epsilon}_m$ [1,2]. Эти модели учитывают центральную частоту, вид поляризации электромагнитных волн, видовой состав леса и его относительную влажность H ($0 < H < 1$), относительную объемную концентрацию лесной растительности f_F [10] ($0.001 < f_F < 0.1$).

При описании процессов распространения радиоволн рассматривается многослойная модель [2]. В этом случае выражение для диэлектрической относительной проницаемости $\dot{\epsilon}_F$ для деревьев и его элементов задается соотношением на основе относительной комплексной диэлектрической проницаемости воды $\dot{\epsilon}_w$ и относительной влажности H $\dot{\epsilon}_F = H\dot{\epsilon}_w + 2.5(1-H)$,

$$\dot{\epsilon}_w = \epsilon_{w0} + \frac{\epsilon_w - \epsilon_{w0}}{1 + (2\pi f \tau)^2} - j \left[\frac{2\pi f \tau (\epsilon_w - \epsilon_{w0})}{1 + (2\pi f \tau)^2} + \frac{\sigma_w}{2\pi f \epsilon_0} \right] \quad [2]; \quad \epsilon_w = 80, \quad \epsilon_{w0} = 5.27$$

- диэлектрическая проницаемость воды на низких и высоких частотах; $\tau = 8 \cdot 10^{-12}$ с - постоянная времени; σ_w - проводимость ионов соли в воде.

Это представление дает возможность оценить эффективную относительную диэлектрическую проницаемость лесов $\dot{\epsilon}_m$: если \vec{E} направлен параллельно стволам (горизонтальная поляризация), то $\dot{\epsilon}_m = 1 + f_F(\dot{\epsilon}_F - 1)$, если \vec{E} направлен перпендикулярно стволам (вертикальная поляризация), то $\dot{\epsilon}_m = \frac{\dot{\epsilon}_F}{\dot{\epsilon}_F - f_F(\dot{\epsilon}_F - 1)}$ [2].

Коэффициент передачи Френеля $\dot{G}(f)$ для среды атмосфера-лес определяется соотношением $\dot{G}(f) = \frac{2}{\sqrt{\dot{\epsilon}_m} + 1}$.

Искаженные сигналы $\hat{s}(t)$ при распространении представляются как результат линейной фильтрации передаваемых сигналов $s(t)$ [5,6]

$$\hat{s}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \dot{S}(f) \dot{H}_r(z, f) \exp(j2\pi f t) df . \quad (2)$$

Здесь $\dot{S}(f)$ - спектр сигнала $s(t)$; $\dot{H}_r(f) = |\dot{H}_r(f)| \exp(j2\pi f \tau(f))$ - коэффициент передачи радиолинии для частоты f как линейного фильтра; $\tau(f) = \exp(j2\pi f L / c_\phi(f))$ - время распространения сигнала с частотой f вдоль радиолинии с длиной L до приемного устройства; $c_\phi(f) = c / \text{Re}(\sqrt{\dot{\epsilon}_m})$ - фазовая скорость; $|\dot{H}_r(f)| = |\dot{E}(0, f)| \exp(-j2\pi f \text{Im}(\sqrt{\dot{\epsilon}_m}) / c)$.

Вид сигнала $\hat{s}(t)$ определяется путем оценивания коэффициента передачи $\dot{H}_r(f)$ для f в частотном диапазоне сигналов ΔF и вычисления соотношения (2).

Одной из основных характеристик систем передачи информации является вероятность ошибки на информационный бит P_σ при приеме цифровых сигналов [4]. Для канала с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ) оптимальный прием основан на вычислении взаимной корреляции реализации на входе приемного устройства $r(t) = \hat{s}(t) + n(t)$ с передаваемым сигналом $s(t)$ при условии выполнения тактовой синхронизации. При моделировании производилась оценка вероятности P_σ для цифровых сигналов $s(t)$ с «созвездием» фазовой манипуляции (ФМ сигналы) [4]. На рис.1 приведены вероятности ошибки P_σ для ФМ8 сигналов при их при распространении по линии, поляризация электрического поля горизонтальная, длина линии $L = 10$ м, затухание монохроматического сигнала с центральной частотой $f_0 = 400$ МГц равно 10 дБ. По оси абсцисс отложены значения E_σ / N_0 для АБГШ.

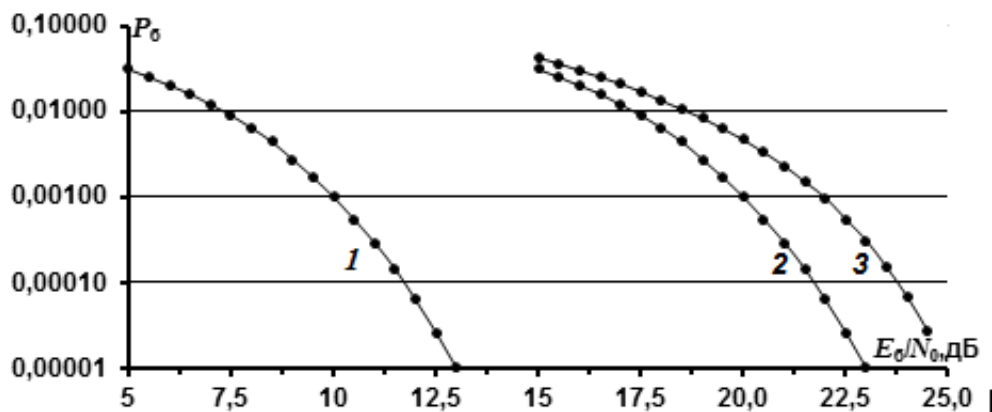


Рис. 1. Вероятностные характеристики приема ФМ8 сигналов: 1 – распространение в свободном пространстве; 2 – распространение по линии с затуханием 10 дБ; 3 – распространение в лесу, поляризация горизонтальная, $T = 200$ нс, $\Delta F = 10$ МГц

Кривая 1 соответствует распространению в свободном пространстве. Кривая 2 соответствует распространению в свободном пространстве с эквивалентным затуханием 10 дБ. Кривая 3 соответствует длительности элементарных сигналов $T = 200$ нс (частотная полоса $\Delta F = 10$ МГц), для вероятности $P_\sigma = 10^{-5}$ энергетические

потери по отношению к кривой 2 за счет интерференционных помех в дополнение к АБГШ достигают 3.5 дБ.

Выводы

Оценочные значения энергетических потерь (1.5...3.5 дБ) при использовании рассматриваемого класса ФМ сигналов необходимо учитывать при оценивании энергетических бюджетов радиолиний распространения сигналов с расширением их полосы в лесных массивах.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект №20-07-00525).

Литература

1. Tamir T. On radio wave propagation in forest environments. // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1967. V.15. №6. P.806-817.
2. Попов В.И. Распространение радиоволн в лесах. М.: Горячая линия – Телеком, 2015. 392 с.
3. Permyakov V.A., Michailov M.S., Malevich E.S. Calculation of the radar station field in 3D space in the presence of forest and other obstacles by the method of parabolic equation. 2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium – Spring (PIERS). St Petersburg, Russia. 2017. P.3754-3757.
4. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М.: Издательский дом “Вильямс”, 2003. 1104 с.
5. Назаров Л.Е., Батанов В.В. Анализ искажений радиоимпульсов при распространении по ионосферным линиям передачи спутниковых систем связи. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2016. Т.21. №5. С.37-45.