

Анализ искажений цифровых сигналов при распространении по спутниковым радиополосам с туманом

Л.Е. Назаров¹, Б.Г. Кутуза², Д.П. Егоров²

¹ Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 141190, Фрязино Московской обл., пл. Введенского, 1.

E-mail: levnaz2018@mail.ru

² Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Адрес: 125009, Москва, ул. Моховая 11, корп. 7

E-mail: kutuza@cplire.ru

² Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Адрес: 125009, Москва, ул. Моховая 11, корп. 7

E-mail: dobrix95@gmail.com

Даны результаты анализа искажений цифровых сигналов при распространении по спутниковым радиополосам с туманом со свойствами частотной дисперсии и поглощения. Показано, что основные характеристики моделей анализируемых радиополос определяются водностью, несущей частотой и частотным диапазоном, температурой и геометрией для радиополос с туманом. С использованием рассматриваемой модели искажений при распространении по радиополосе с туманом разработан метод оценивания энергетических потерь при приеме частотно-эффективных цифровых сигналов. Показана возможная значительная деградация вероятностных характеристик и значительное увеличение энергетических потерь при приеме ряда рассматриваемых цифровых сигналов при увеличении их частотной эффективности и увеличении частотной полосы по отношению к распространению в свободном пространстве.

Ключевые слова: спутниковые радиополосы, радиополосы с туманом, цифровые сигналы, искажения

Analysis of digital signal distortions during propagation over satellite radio channels with fog

L.E. Nazarov¹, B.G. Kutuza², D.P. Egorov²

¹ Fryazino Branch, Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics, Russian Academy of Sciences

² Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics, Russian Academy of Sciences

The results of the analysis of digital signal distortions during propagation via satellite radio channels with fog with properties of frequency dispersion and absorption are given. It is shown that the main characteristics of the models of the analyzed radio channels are determined by the water content, carrier frequency and frequency range, temperature and geometry for radio channels with fog. Using the considered model of distortions during propagation over a radio line with fog, a method is given for estimating energy losses during the reception of frequency-effective digital signals. The possible significant degradation of probability characteristics and a significant increase in energy losses during the reception of a number of considered digital signals with an increase in their frequency efficiency and an increase in the frequency band in relation to propagation in free space are shown. Keywords: space channels, channels with fog, digital signals, distortions of signals

Введение

Модели распространения сигналов по спутниковым радиолиниям с учетом свойств физических природных сред (ионосфера, тропосфера, др.) применяются для разработки методов и алгоритмов приема цифровых сигналов, при оценке энергетических бюджетов для информационных систем [1,2]. Самостоятельное научное направление использования этих моделей составляет анализ искажений цифровых частотно-эффективных сигналов при распространении по радиолиниям с гидрообразованиями (дождь, облака, снег, др.) за счет поглощающих и дисперсионных свойств этих сред [1-6].

В докладе рассматривается модель дисперсионной и поглощающей радиолинии с туманом [3-6], определяемая рядом параметров - углом прямой видимости θ_A , центральной частотой, водностью, др. Физическая среда распространения с туманом представляется квазиоднородной дисперсионной средой с эффективной комплексной диэлектрической проницаемостью [4,5]. Этот подход позволяет оценить ослабление узкополосных сигналов при распространении в зависимости от центральной частоты - искажения их комплексных огибающих полагается незначительными.

Актуальной является задача оценивания рассматриваемых искажений при увеличении частотной эффективности цифровых сигналов (при увеличении частотной полосы в сочетании с повышением порядка манипуляции [5,7]), вычисляя вероятностные характеристики при распространении и сравнения с вероятностными характеристиками при распространении в свободном пространстве.

Модель спутниковой радиолинии с туманом

Распространение плоской волны с частотой f для модели радиолинии с туманом в виде однородной дисперсионной среды задается решением волнового уравнения для амплитуды электрического поля $\dot{E}(z, f)$ с относительной диэлектрической проницаемостью среды $\dot{\epsilon}(f)$ [1]

$$\nabla^2 E + k^2 n(\vec{r}) E = 0, \quad k = 2\pi / \lambda - \text{волновое число.} \quad (1)$$

Решение волнового уравнения (1) имеет вид $\dot{E}(z, f) = \dot{E}(0, f) \exp\left(-j \frac{2\pi f}{c} \dot{n}(f) z\right)$,

$\dot{n}(f) = \sqrt{\dot{\epsilon}(f)}$ - коэффициент преломления среды.

Мнимая часть $\text{Im}(\dot{n}(f))$ определяет ослабление сигналов, реальная часть $\text{Re}(\dot{n}(f))$ определяет дисперсионные свойства среды - зависимость фазовой скорости от частоты f [4].

Для цифровых сигналов в виде последовательности импульсов $s_i(t)$ с манипуляционным сигнальным «созвездием» задача усложняется - сигналы $s(t)$ представляются суммой спектральных монохроматических составляющих, которые при распространении приобретают частные фазовые и амплитудные смещения за счет дисперсионных и поглощающих свойств тумана [5]. Действие радиолинии с туманом обуславливает искажение комплексных огибающих цифровых сигналов и возникновение интерференционных межсимвольных помех в дополнение к канальным тепловым шумам [5]. Для класса частотно-эффективных сигналов эти помехи могут привести к существенному снижению надежности передачи информации по рассматриваемым радиолиниям.

Искаженные сигналы при распространении по радиолинии с туманом представляются как результат линейной фильтрации переданных сигналов

$\hat{s}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \dot{S}(f) \dot{H}(z, f) \exp(j2\pi f t) df$, $\dot{S}(f)$ - спектр передаваемого сигнала $s(f)$;

$\dot{H}(f) = \exp(j2\pi f \tau(z, f))$ - коэффициент передачи радиолинии с туманом, как линейного фильтра; $\tau(z, f)$ - время распространения гармонического сигнала по радиолинии с туманом длиной z и с частотой f .

Туман - сферические капли воды, приближением распределения капель по размерам R является гамма-распределение [6] $N(R) = \frac{\mu^{\mu+1}}{\Gamma(\mu+1)} \frac{R^{\mu}}{R_m^{\mu+1}} \exp\left(-\frac{\mu R}{R_m}\right)$, μ - параметр; R_m - наиболее вероятный размер капель. При вычислениях задавались значения $\mu = 4$, $R_m = 4$ мкм [6]: вычисления показывают, что вероятность капель с размером $R > 20$ мкм не превышает 0.00002 - размер капель не более несколько десятков микрометров. Параметром тумана является водность q (г/м³), связанная с дальностью видимости S . Для среднего тумана $q = 0.05$ г/м³ и $S \approx 300$ м, для сильного тумана $q \geq 0.2$ г/м³ и S не превышает 50...200 м. Высота туманов достигает 50...500 м, туманы достаточно однородны относительно водности q .

Модель радиолинии с туманом представляет смесь водных капель и воздуха диэлектрической средой. Водная сфера с радиусом R имеет эквивалентный электрический момент $\vec{p} = 4\pi R^3 \frac{\dot{\epsilon}_w - \epsilon_0}{\dot{\epsilon}_w + 2\epsilon_0} \epsilon_0 \vec{E}$ в электрическом поле \vec{E} в приближении Релея при условии $R \ll \lambda$ (λ - длина волны) [4,5], $\dot{\epsilon}_w, \epsilon_0$ - коэффициенты диэлектрической проницаемости воды и свободного пространства.

Коэффициент относительной эффективной диэлектрической проницаемости среды $\dot{\epsilon}(f)$ задается соотношением [5] $\dot{\epsilon}(f) = \left(1 + 3 \frac{\dot{\epsilon} - 1}{\dot{\epsilon} + 2} \frac{q}{\rho}\right)$, $\dot{\epsilon}$ - коэффициент относительной диэлектрической проницаемости воды.

Выражение для $\dot{\epsilon}$ имеет вид [3]

$$\dot{\epsilon} = \frac{\gamma_0 - \gamma_1}{1 + (f/f_p)^2} + \frac{\gamma_1 - \gamma_2}{1 + (f/f_s)^2} + \gamma_2 + j \left(\frac{f(\gamma_0 - \gamma_1)}{f_p + f^2/f_p} + \frac{f(\gamma_1 - \gamma_2)}{f_s + f^2/f_s} \right),$$

$$\gamma_0 = 77.66 + 103.3(\alpha - 1), \gamma_1 = 0.0671\gamma_0, \gamma_2 = 3.52,$$

$$\alpha = 300/T_0, f_p = 20.20 - 146(\alpha - 1) + 316(\alpha - 1)^2, f_s = 39.8f_p.$$

Здесь f - частота (ГГц); T_0 - температура воды (K).

Модель спутниковой радиолинии с туманом

Оценивание энергетических потерь ΔE при распространении цифровых сигналов по радиолинии с туманом относительно распространения в свободном пространстве произведено для модели радиолиний с параметрами: водность $q = 0.2$ г/м³ и $q = 0.05$ г/м³; высота тумана 100 м; угол $\theta_A = 0$ и $\theta = 60^\circ$; температура воды $T_0 = 273$ K; центральная частота 30 ГГц; длительность цифровых сигналов $T = 2$ нс (частотная полоса $\Delta F = 1$ ГГц).

На рис.1 даны вероятностные характеристики при приеме частотно-эффективных сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией (КАМ-64, частотная

эффективность 6 бит/с/Гц [7]): кривая 1 - вероятность P_c при распространении в свободном пространстве с аддитивным белым гауссовским шумом, вероятность $P_c = 10^{-5}$ достигается при отношении сигнал/помеха $E_b/N_0 = 17.5$ дБ. Кривые 2, 4 вычислены с учетом искажающего влияния радиолинии с туманом с параметрами $q = 0.05$ г/м³, $\theta_A = 0$ (кривая 2) и $\theta_A = 60^\circ$ (кривая 4): значение $P_c = 10^{-5}$ достигается при 18.5 дБ и 18.75 дБ (значения ΔE равны 1.0 дБ и 1.25 дБ).

Кривые 3, 5 вычислены с учетом искажающего влияния радиолинии с туманом с параметрами $q = 0.2$ г/м³, $\theta_A = 0$ (кривая 3) и $\theta_A = 60^\circ$ (кривая 5). В этом случае вероятность ошибки $P_c = 10^{-5}$ достигается при 20.5 дБ и 23.5 дБ (энергетические потери ΔE достигают 3.0 дБ и 6.0 дБ).

Подобные результаты относительно вероятностных характеристик и энергетических потерь ΔE для моделей радиолинии с туманом получены также для других рассматриваемых цифровых сигналов. Вычисленные значения энергетических потерь ΔE даны в таблице 1.

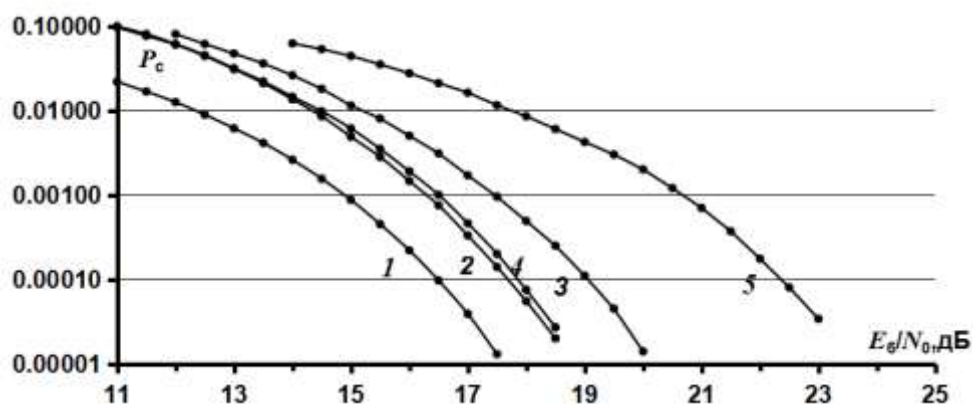


Рис.1. Вероятности ошибки при приеме сигналов КАМ-64: 1 -распространение в свободном пространстве; 2 - радиолиния с туманом ($q = 0.05$ г/м³, $\theta_A = 0$); 3 - радиолиния с туманом ($q = 0.2$ г/м³, $\theta_A = 0$); 4 - радиолиния с туманом ($q = 0.05$ г/м³, $\theta_A = 60^\circ$); 5 - радиолиния с туманом ($q = 0.2$ г/м³, $\theta_A = 60^\circ$).

Таблица 1. Энергетические потери ΔE (дБ) при распространении цифровых сигналов по радиолинии с туманом

Сигналы	ΔE			
	$\theta_A = 0$		$\theta_A = 60^\circ$	
	$q = 0.2$ г/м ³	$q = 0.05$ г/м ³	$q = 0.2$ г/м ³	$q = 0.05$ г/м ³
ФМ-8	0.75	0.5	1.75	0.75
АФМ-8	0.25	<0.2	0.75	0.50
ФМ-16	2.0	0.50	3.50	1.50
КАМ-16	0.5	0.25	2.0	0.5

АФМ-16	0.25	<0.2	1.0	0.5
КАМ-64	3.0	1.0	6.25	1.25

Выводы

Даны результаты развития теории искажений цифровых сигналов при распространении по спутниковым радиополосам с туманом со свойствами частотной дисперсии и поглощения. Основные характеристики модели анализируемых радиополос определяются водностью q , несущей частотой и частотным диапазоном, температурой и геометрией для радиополос с туманом.

С использованием рассматриваемой модели искажений при распространении по радиополосе с туманом приведены разработанные методы оценивания энергетических потерь при приеме частотно-эффективных цифровых сигналов. Показана возможная значительная деградация вероятностных характеристик и значительное увеличение энергетических потерь (до 10 дБ и более) при приеме цифровых сигналов при увеличении их частотной эффективности и при увеличении частотной полосы по отношению к распространению в свободном пространстве.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Литература

1. Спилкер Дж. Цифровая спутниковая связь. М.: Связь, 1979.
2. Proakis J.G., Salehi M. Digital communication. 5 Edition. McGraw-Hill, Higher Education, 2001.
3. Recommendation ITU-R P.840-4. Attenuation due to clouds and fog. P Series "Radiowave propagation". Electronic Publication. 2009. Geneva. 28 p. https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.840-7-201712-S!!PDF-E.pdf
4. Кутуза Б.Г. Фазовое запаздывание радиоволн в неоднородной атмосфере. // Радиотехника и электроника. 1974. Т.19. №4. С.665-670.
5. Назаров Л. Е., Батанов В. В., Кутуза Б. Г. Влияние трансионосферных линий передачи на вероятностные характеристики при приеме сигналов с фазовой манипуляцией. // Радиотехника и электроника. 2023. Т. 68. № 1. С. 60–68.
6. Пожидаев В.Н. Оценки ослабления и обратного рассеяния миллиметровых радиоволн в метеорологических образованиях. // Радиотехника и электроника. 2010. Т. 55. № 11. С. 1311–1318.
7. Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications Part 2: DVB-S2 Extensions (DVB-S2X) DVB. 2020. Document A083-2. European Broadcasting Union CH-1218, Geneva. 159 p.