Модели рефракции радиоволн при распространении по трансионосферным радиолиниям

Назаров Л.Е. (1), Батанов В.В. (2)

(1) Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал (ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН), г.Фрязино, Россия

(2) АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва», г.Железногорск, Россия

Цель работы - анализ вероятностных характеристик при приеме вероятностных характеристик при приеме цифровых сигналов с учетом рефракции радиоволн при распространении по трансионосферным радиолиниям.

Околоземная ионосфера, как непрерывная неоднородная среда, характеризуется высотным профилем электронной плотности $N_э(z)$ (эл/см^3) на высоте z и диэлектрической проницаемостью $\varepsilon(f,z)$. Для несущих частот, используемых в спутниковых информационных системах и для изотропной радиолинии параметр $\varepsilon(f,z)$ задается соотношением $\varepsilon(f,z)=1-\Delta$, здесь $\Delta = f_p^2(z)/f^2$; $f_p(z)=\sqrt{\dfrac{N_э(z)e^2}{(2\pi)^2\varepsilon_0 m}}$ - собственная частота ионосферы (кГц); $e=1.6\cdot10^{-19}$ (Кл), $m=9.106\cdot10^{-31}$ (кг) - заряд и масса электрона; $\varepsilon_0=10^{-9}/(36\pi)$ - диэлектрическая проницаемость свободного пространства (ф/м).

Одной из простых профилей электронной плотности $N_э(z)$ является однослойная модель Чепмена для дневного времени, задаваемая соотношением

$$N_э(z)=\sqrt{\beta\cdot\exp[-(\exp(b(z-z_n))/\cos\theta_A+bz)]},$$

θ_A - зенитный угол направления линии прямой видимости. В надире ($\theta_A=0$) значение $N_n=N_{э,макс}\le10^6$ эл/см^3 достигается при $z_n=300$ км (параметры $b=0.01$, $\beta=5\cdot10^{13}$), соответствующее значение собственной частоты равно $f_p=9$ МГц.

Наиболее информативный метод описаний сигналов с искажениями $\hat{s}(t)$ основан на использовании комплексного коэффициента передачи трансионосферной радиолинии $\dot{H}(z,f)$, действие которой эквивалентно линейному фильтру $\hat{s}(z,t)=\mathrm{Re}\left(\int\limits_{-\infty}^{\infty}\dot{S}(f)\dot{H}(z,f)\exp(j2\pi ft)df\right)$, $\dot{S}(f)$ - спектр исходного сигнала $s(t)$, $\dot{H}(f,z)=\exp(-j2\pi f\tau(f,z))=\exp\left(-j2\pi f\int\limits_{AB}\dfrac{dx}{c_ф(f,x)}\right)$, $\tau(f,z)$ - время распространения сигнала с частотой f вдоль лучевой линии; $c_ф(f,x)=\dfrac{c}{n(f,x)}$ - фазовая скорость; $n(f,x)=\sqrt{\varepsilon(f,x)}$ - коэффициент преломления.

Отличие времени распространения сигнала вдоль линии распространения и линии прямой видимости $\Delta\tau(f,z)=\tau(f,z)-L_{AB}/c$ определяется как

$$\Delta\tau(f,z)=\int_0^z \frac{n(f,x)(R_З+x)dx}{c_ф(f,x)\sqrt{n^2(f,x)(R_З+x)^2-(n_0R_З\sin(\theta_A-\xi_A))^2}}-\frac{L_{AB}}{c},$$

здесь $R_З$ - радиус Земли; n_0 - коэффициент преломления на высоте $z=0$; ξ_A - угол рефракции; $L_{AB}=\sqrt{(R_З+z)^2-R_З^2\sin^2\theta_A}-R_З\cos\theta_A$ - расстояние линии прямой видимости.

Известен ряд аналитических соотношений для оценивания угла рефракции ξ_A. В частности, для двумерно-неоднородной ионосферной среды, высоты спутника z известно формульное выражение для вычисления ξ_A

$$\xi_A=\frac{e^2\sin\theta_A}{2m_e\pi f^2}\frac{R_З\sqrt{(R_З+z)^2-R_З^2\sin^2\theta_A}}{(R_З+z_m)L_{AB}((R_З+z_m)^2-R_З^2\sin^2\theta_A)^{3/2}}\int_0^z N_э(x)dx,$$

Выражение корректно при ограничениях: высота удовлетворяет условию $z>z_m$ (высота z_m соответствует максимальному значению электронной плотности N_m), верно условие $\Delta<<1$ (которое выполняется для $f_0>100$ МГц, значения угла рефракции $\xi_A<<1$ (радиан), $\cos^2\theta_A>>\Delta$. Показано, что при этих ограничениях выражение справедливо для трансионосферных радиолиний: для несущих частот $f_0\geq 400$ МГц вычисленные значения $\xi_A<0.00032$ радиан, возможный диапазон значений зенитных углов $\theta_A\in[0,87.5^0]$.

Значения ξ_A уменьшаются при увеличении центральной частоты по закону f^{-2}. Эффективность искажений сигналов $s(t)$ при распространении по трансионосферным радиолиниям также уменьшается по такому закону.

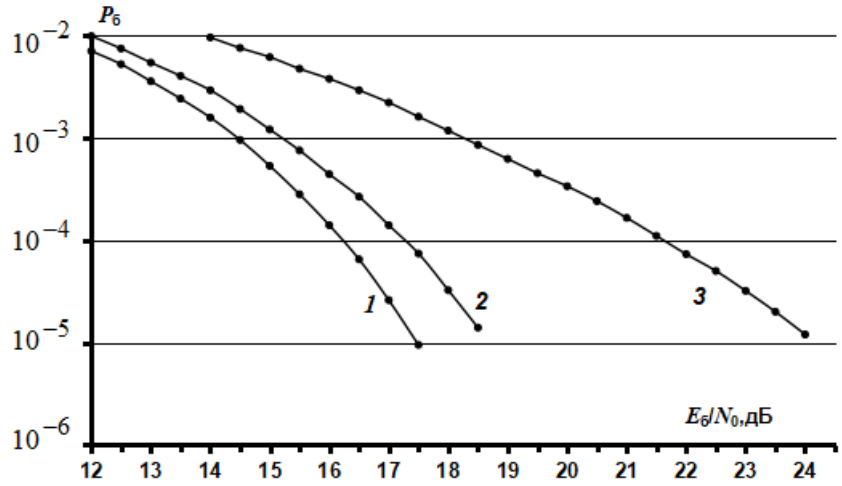
Ниже приведены результаты моделирования алгоритма приема класса OFDM сигналов с целью оценивания вероятностных характеристик и энергетических потерь ΔE при распространении по трансионосферной радиолинии Р- частного диапазона ($f_0=400$ МГц, высота радиолинии $z=400$ км) с учетом угла рефракции по отношению к распространению в свободном пространстве.

На рисунке приведены вероятностные характеристики (вероятности ошибки на бит $P_б$) приема OFDM сигналов на основе парциальных цифровых сигналов с фазовой манипуляцией ФМ-16. По оси абсцисс даны значения параметра сигнал/шум $E_б/N_0$, $E_б$ - энергия на бит, N_0 - спектральная плотность аддитивного шума АБГШ. По оси ординат даны вычисленные значения $P_б$ приема сигналов с искажениями $\hat{s}(t)$ за счет неортогональности парциальных сигналов в дополнение к аддитивному шуму АБГШ. Варьируемые параметры: зенитный угол θ_A, значения сигнал/шум $E_б/N_0$, частотная полоса OFDM сигналов (количество парциальных сигналов N).

Дискретные частоты OFDM сигналов f_m кратны $1/T$, при моделировании задавалось $T=3$ мкс (частотный дискрет 333333.3(3) Гц, частотная полоса $\Delta F=N/T$).

Кривые 2, 3 на рисунке определяют вероятности $P_б$ для OFDM сигналов при распространении, параметры $N=16,\theta_A=0$ (частотная полоса 5 МГц) и $N=32,\theta_A=0$

(частотная полоса 10 МГц) - энергетические потери ΔE достигают 1.0 дБ и 6.5 дБ соответственно для вероятности $P_б = 10^{-5}$



Вероятностные характеристики приема OFDM сигналов на основе ФМ-16: 1 - прием для АБГШ; 2 - прием сигналов с искажениями ($N = 16, \theta_A = 0$); 3 - прием сигналов с искажениями ($N = 32, \theta_A = 0$).

Заключение

Приведен метод оценивания углов рефракции радиосигналов при их распространении по трансионосферным радиолиниям. Путем моделирования алгоритма приема OFDM сигналов на основе ФМ-16 с учетом частотной оценки углов рефракции показано существенное снижение вероятностных характеристик по отношению к распространению в свободном пространстве.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!