

Компенсация дисперсионных искажений, ограничивающих полосу частот космической радиолинии

М.В. Терентьев, Н.П. Чубинский

Московский физико-технический институт (Государственный университет), 141700, г. Долгопрудный, Московской обл., Институтский пер., 9 E-mail: nchub@mail.mipt.ru

Приведены оценки максимальной полосы частот космических радиолиний Космос-Земля и Космос-Космос высокоскоростной системы связи X-диапазона. Такая система разрабатывается для группировки малых космических аппаратов, работающих на высокоширотных орбитах. Ограничение полосы частот обусловлено дисперсионными свойствами ионосферы, параметры которой изменяются в широких пределах. Метод оценки дисперсионных искажений основан на прогнозах распределения концентрации электронов в ионосфере вдоль трасс распространения сигнала. Предложен метод компенсации дисперсионных искажений таких радиолиний, в том числе и при ретрансляции, снимающий в большинстве случаев указанные ограничения.

Estimations of the maximal frequency band of space radio link the Space - Earth and Space - Space are resulted for high-speed communication system of the X-range. Such system is developed for a grouping of the small space vehicles working in high-altitude orbits. Restriction of a bandwidth is caused by dispersive properties of an ionosphere which parameters change over a wide range. The method of an estimation a dispersive margin is based on forecasts of the electron density distribution in an ionosphere along lines of the signal propagation. The method of the dispersive distortions equalizing of that radiolines, including at the relaying is offered, it is removing in most cases specified restrictions.

1. В современных спутниковых группировках высокочастотного мониторинга Земли с высоким разрешением важную роль играет оперативность сброса большого объема данных на наземный контур управления (НКУ). Ограничения на полосу частот радиолинии, связанную с предельной скоростью передачи данных, определяются дисперсионными свойствами ионосферы [1,2]. Известно, что концентрация электронов в ионосфере зависит от солнечной активности и положения рассматриваемой радиотрассы относительно Солнца и сильно изменяется в течение суток от максимального значения в полуденное местное время, до минимального – в полуночное. В связи с этим изменяются характеристики ионосферы и ограничения на полосу частот радиолинии, что вынуждает корректировать скорости потока данных радиолинии для компромиссного разрешения проблем оперативности и целостности данных. Целью исследования является создание фазокорректирующих устройств, устраняющих в той или иной степени дисперсионные искажения радиосигналов в ионосфере и снимающих ограничения на рабочую полосу частот космических радиолиний. Оценим максимально допустимые полосы частот космических радиолиний для обмена данными связи группировки спутников. В качестве примера рассмотрим локальный регион мониторинга – Республика Хакасия. Целевая функция группировки малых космических аппаратов (МКА) – выявление очагов степных пожаров и предотвращение их на ранних стадиях. В результате моделирования баллистической задачи были получены следующие параметры орбит:

орбита – солнечно-синхронная с кратностью замыкания одни сутки; наклонение орбиты – $96,4^\circ$; высота – 535...570 км; период обращения МКА по орбите – 96,07 мин; период замыкания трассы – 15 витков; количество МКА в орбитальной группировке – 8, находящихся в разных плоскостях; межвитковое угловое расстояние между орбитами в плоскости экватора – $\approx 24^\circ$ ($23,998^\circ$). Таким образом, трассы всех

спутников ложатся друг на друга и в точности повторяются каждые сутки. Стартовые точки всех МКА расположены на экваторе. Станции НКУ расположены в городах Мегион и Иркутск, частотный диапазон информационных радиолиний 8025...8400 МГц.

2. Наличие дисперсии в ионосфере приводит к изменению времени распространения сигнала по сравнению со свободным пространством, именуемого групповой задержкой t_2 , которая имеет следующий вид [3]:

$$t_2 = 1,345 \frac{N_t}{f^2} 10^{-7} [c], \quad (1)$$

где $f, [Гц]$ – частота сигнала,

$N_t, [эл/м^2]$ – полное содержание электронов (ПСЭ) вдоль трассы распространения.

Если сигнал занимают полосу частот Δf , то возникают дисперсионные искажения, приводящие к удлинению радиоимпульсов при увеличении длины трассы. Для неискажённой передачи сигнала разность групповых задержек крайних составляющих широкополосного сигнала (дифференциальная задержка сигнала) должна быть много меньше длительности сигнала. Из (1) и соотношения неопределённостей получаем качественное неравенство:

$$2,69 \cdot 10^{-7} \frac{N_t \Delta f^2}{f^3} \ll 1 \quad (2)$$

где $\Delta f = 375$ МГц – ширина полосы сигнала,

$f_0 = 8212,5$ МГц – средняя частота спектра.

Используя количественное неравенство – $2,69 \cdot 10^{-7} \cdot N_t \Delta f^2 \leq 0,1 f_0^3$, получим соотношение для оценки максимальной полосы частот:

$$\Delta f_{\max} \approx 0,61 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{f_0^3 / N_t}. \quad (4)$$

Зависимость Δf_{\max} от ПСЭ, позволяет сделать следующий вывод: максимальное ограничение на полосу частот накладывается в дневное местное время (около 14:00), то есть при максимальном ПСЭ, а минимальное – в ночное (около 02:00) при минимальном ПСЭ. В остальное время суток, при отсутствии возмущений Солнца ПСЭ для фиксированной трассы лежит в пределах от минимального ночного значения до максимального дневного. Следует также отметить, что рассматриваемые земные станции расположены в среднеширотной области, для которой основные параметры ионосферы регулярно обновляются.

3. Для оценок ПСЭ на наклонных трассах использовались рекомендуемые МСЭ-Р модель «NeQuick2 Ionospheric model» и накопленные статистические данные средних от среднемесячных значений параметров солнечной активности [4-6]. Для анализа были выбраны фиксированные орбиты спутников. Учитывая периодичность солнечной активности (в среднем 11 лет), для расчётов была использована статистика за 15 лет, с 1997 по 2012 год. На Рис. 1 приведена динамика изменения ПСЭ при движении МКА между станциями НКУ «Мегион» и «Иркутск» в 1997-2011 гг. Минимумы ПСЭ соответствуют кратчайшему расстоянию от спутника до НКУ.

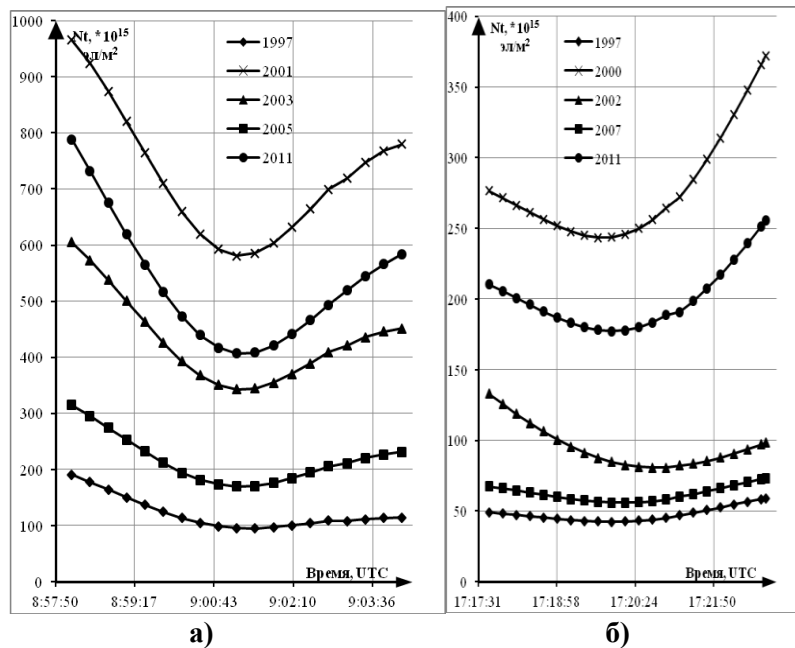


Рис. 1. Изменение ПСЭ на радиотрассах во время сеансов связи с земными станциями: а) «Мегион» в дневное местное время, б) «Иркутск» в ночное местное время за период 1997-2012 гг. в месяцы максимальной солнечной активности.

На Рис. 2а показаны изменения максимальных значений ПСЭ за 15-тилетний период в дневное и ночное время в тех же наземных пунктах. На основании этих данных найдены максимальные частотные полосы для радиолиний за тот же период (Рис.2б).

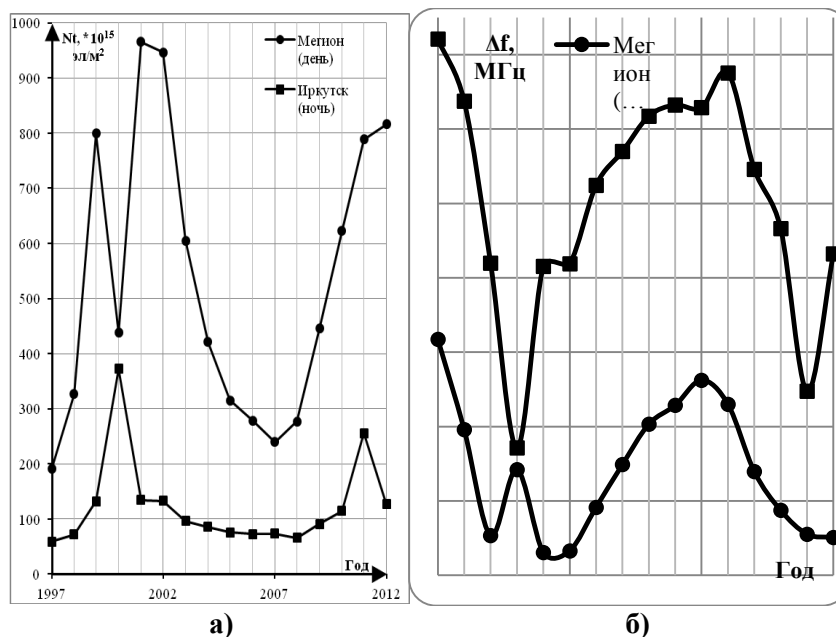


Рис. 2. а) –максимальные значения ПСЭ и б) – соответствующие им ограничения полосы частот на трассах во время сеансов связи с НКУ «Мегион» и «Иркутск» в дневное и ночное местное время соответственно по годам за период 1997-2012 гг. в месяцы максимальной солнечной активности.

Согласно полученным оценкам установлено, что в X-диапазоне минимальная полоса частот радиоканалов МКА-Земля и МКА-МКА составляет не менее 400...450 МГц, что соответствует дневным сеансам связи. В ночных сеансах достигается

максимальная полоса частот в 2...3 раза большая. Это позволяет в ночное время повышать скорость передачи информации, приблизительно в полтора-два раза превышающих максимальные дневные скорости.

4. Обратимся теперь к возможным способам компенсации дисперсионных искажений радиосигналов на радиотрассах, частично или полностью проходящих через ионосферу, которые приводят к удлинению импульсных посылок и уменьшают межсимвольный интервал. Функция концентрации электронов N_e в зависимости от высоты над поверхностью Земли имеет один или два максимума. Она, так же как ПСЭ, существенно зависит координат, времени суток, солнечной активности и т.п. Полная фаза сигнала на радиотрассе имеет две составляющие – $\varphi_{\Sigma} = \varphi_l(r_1) + \varphi_u(r_2)$, где $r = r_1 + r_2$ – полная длина трассы. Первое слагаемое определяет набег фазы на участке(-ах) радиотрассы с пренебрежимо малой концентрацией электронов – $\varphi_l(r_1) = 2\pi f \cdot r_1/c$ – пропорционально частоте и длине первого отрезка и не приводит к искажению формы сигнала. Второе слагаемое относится к участку, лежащему в ионосфере, и, в силу неоднородности $N_e(h, \dots)$, определяется интегралом по его длине. В итоге появляется коэффициент ПСЭ $N_f(r_2)$, не линейнозависящий от частоты и определяющий дисперсионные искажения. Параметр N_e локально определяет эффективный коэффициент преломления ионосферы, который функционально отражает дисперсионные свойства среды, –

$$n_u \approx \sqrt{1 - (f_{кр}/f)^2}, \quad (5)$$

где $f_{кр}(N_B) \approx \sqrt{80,8N_B} \ll f_0$ – критическая частота.

Критические частоты земной ионосферы лежат приблизительно в интервале (5...15) МГц.

Возможными вариантами компенсации нелинейности фазовой характеристики трассы могут быть волноводные устройства и фазокорректирующие фильтры на сосредоточенных элементах. Первые обладают сильной дисперсией, имеющей точно такой же вид (5), как и ионосфера, и поэтому привлекательным решением может быть отрезок неоднородного волновода определённой длины $l \ll r_2$ (Рис.3а). При распространении сигнала от порта **1** к порту **2** происходит компенсация дисперсионных искажений ионосферного канала, а при распространении в обратном направлении исходный сигнал приобретает вид искажённого ионосферой.

Чтобы понимать каковы реальные искажения на космических радиотрассах приведём характерные оценки параметров. При полосе частот исходного сигнала $\Delta f = 375$ МГц длительность посылки около 3 нс, а число периодов несущей около 24,5. Если критическая частота изменяется в диапазоне (5...15) МГц, дисперсия удлиняет импульс на (1...4) периода, которой соответствует необходимая величина компенсации фазовой характеристики на $(2...8)\pi$. Это не слишком много, но требует определённой длины фазового волновода корректора. В силу громоздкости последних в частотном диапазоне ниже 10 ГГц их использование может быть проблематичным.

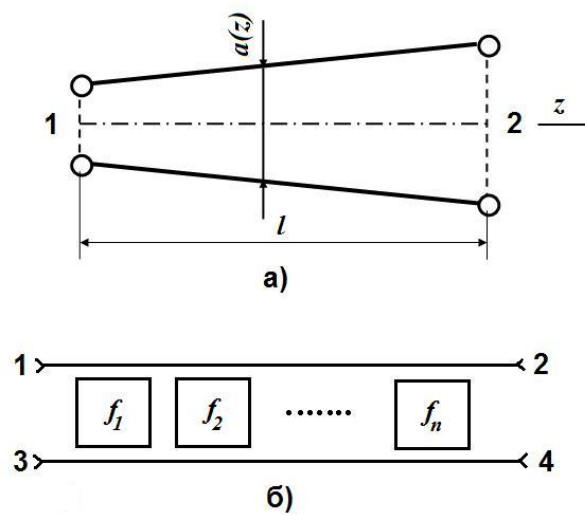


Рис. 3.

На Рис. 3б показан схематично многоканальный микрополосковый направленный фильтр с полосой частот $\Delta f = f_e - f_n$. Он содержит n резонансных элементов связи. Если частоты фильтров f_i убывают слева направо $f_e > f_1 > f_2 > \dots > f_n > f_n$, порты **2** и **4** согласованы, а сигнал поступает на входной порт **1**, то на выходе (порт **3**) формируется скорректированный по фазе сигнал. Если поменять местами порты **1** и **3** с портами **2** и **4**, соответственно, подать исходный неискажённый сигнал на вход **2**, то на выходе **4** мы получим искажения сигнала, подобные искажениям ионосферы. Для реализации такого корректора необходимо определить минимальное число фильтров и их частоты, полную длину корректора l и координаты расположения резонансных фильтров связи.

Литература

1. В.В. Никольский, Т.И. Никольская. Электродинамика и распространение радиоволн: Учеб. Пособие для вузов. – 3-е изд. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит, 1989. – 544 с.
2. К. Дэвис. Радиоволны в ионосфере: Пер. с англ. / Под ред. А.А. Корчака. – М.: Мир, 1973. – 502 с.
3. В.А. Бартенев, Г.В. Болотов, В.Л. Быков и др., под ред. Кантора Л.Я. Спутниковая связь и вещание: Справочник. – 3-е изд. – М.: Радио и связь, 1997. – 528 с.
4. Рекомендации МСЭ-R P.618-10 (10/2009) «Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования, необходимые для проектирования систем связи Земля-космос»
5. Рекомендации МСЭ-R P.531-12 (09/2013) «Данные об ионосферном распространении радиоволн и методы прогнозирования, необходимые для проектирования спутниковых служб и систем»
6. Рекомендации МСЭ-R P.1511-0 (02/2001) «Топография для моделирования распространения на трассе Земля-космос»