

АДАПТИВНЫЙ МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАДИОЛИНИЙ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ВЫБОРОМ РАЦИОНАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

А.Н. Загорулько
(представил д.т.н. С.В. Козелков)

Предложен адаптивный метод передачи информации по высокоскоростным широкополосным каналам связи космических систем с переменной скоростью передачи информации в зависимости от протяжённости радиолинии. Протяжённость радиолинии рассчитывается бортовой системой управления по данным автономной системы навигации (АСН), использующей сигналы GPS и/или «Глонасс». Применение метода позволяет более эффективно использовать занимаемую каналом полосу частот (γ -эффективность).

Введение. Современные и перспективные космические системы дистанционного зондирования характеризуются высокой (до нескольких метров) разрешающей способностью и широкой (до 100 км) полосой обзора, что наряду с использованием много- и мультиспектральных сканирующих устройств определяет повышенные требования к скорости передачи информации по радиоканалу «Борт – Земля» (до 300 Мбит/с и выше) и к её надежности, т.е. к информационным характеристикам радиолинии [1]. Проблема повышения эффективности передачи информации космических систем имеет свои особенности, связанные с ограничениями по габаритным, весовым, частотным, энергетическим и другим характеристикам системы.

В настоящей работе рассмотрены вопросы разработки и создания адаптивной системы передачи информации путём использования переменной скорости передачи информации в зависимости от дальности до космического аппарата (КА).

Связь энергетических и информационных характеристик радиолинии. Максимальная протяжённость радиолинии космической системы ДЗЗ определяется формулой [2]:

$$R_{\max} = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_{\text{прд}} \cdot G_{\text{прд}} \cdot G_{\text{прм}} \cdot \eta_{\text{прд}} \cdot \eta_{\text{прм}} \cdot L_0 \cdot N}{P_{\text{прмmin}}}}, \quad (1)$$

где R_{\max} – максимальная дальность радиолинии; λ – длина волны; $P_{\text{прд}}$ – мощность передатчика; $G_{\text{прд}}$, $G_{\text{прм}}$ – коэффициенты усиления передающей и приёмной антенн; $\eta_{\text{прд}}$, $\eta_{\text{прм}}$ – КПД приёмного и передающего АФУ; L_0 – коэффициент запаса, учитывающий затухание сигнала при

распространении сквозь атмосферу и межпланетное пространство; N – коэффициент запаса, учитывающий потери, обусловленные неравномерностью ДН антенн, а также поляризационные потери; $P_{\text{ПРМ min}}$ – минимально допустимая мощность сигнала на входе приёмника.

Учитывая, что задачу передачи информации с заданной вероятностью можно выполнить, если мощность принимаемого сигнала превышает некоторую пороговую величину [3]:

$$P_{\text{ПРМ min}} = (P_c / P_{\text{ш}})_{\text{min}} \cdot P_{\text{ш}},$$

формула (1) принимает вид

$$R_{\text{max}} = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_{\text{ПРД}} \cdot G_{\text{ПРД}} \cdot G_{\text{ПРМ}} \cdot \eta_{\text{ПРД}} \cdot \eta_{\text{ПРМ}} \cdot L_0 \cdot N}{(P_c / P_{\text{ш}})_{\text{min}} \cdot k \cdot T_{\text{эф}} \cdot F}}, \quad (2)$$

где $(P_c / P_{\text{ш}})_{\text{min}}$ – реальная чувствительность приёмника (отношение сигнал/шум на входе приёмного устройства); $P_{\text{ш}} = k \cdot T_{\text{эф}} \cdot F$ – мощность шумов на входе приемника; F – полоса пропускания ПРМ, Гц; k – постоянная Больцмана; $T_{\text{эф}}$ – шумовая температура приемной системы. Затухания энергии электромагнитных колебаний $L_1 = 10 \lg P_{\text{ПРД}} / P_{\text{ПРМ min}}$ в тракте «выход ПРД – вход ПРМ» в db определяется из (1) следующим образом:

$$L_1 = +22 - G'_{\text{ПРД}} - G'_{\text{ПРМ}} - \eta'_{\text{ПРД}} - \eta'_{\text{ПРМ}} - L'_0 - N' + 20 \cdot \lg \frac{R_{\text{max}}}{\lambda}, \quad (3)$$

где все величины со штрихами выражены в db.

Максимальная скорость передачи сигналов по радиоканалу (пропускная способность) при наличии аддитивного белого гауссового шума определяется соотношением [4]:

$$C = F \cdot \log_2 (1 + P_c / P_{\text{ш}}), \quad (4)$$

где C – скорость передачи информации, $\frac{\text{дв.ед.}}{\text{сек}}$; F – полоса пропускания

по высокой частоте, Гц, P_c – средняя мощность сигнала; $P_{\text{ш}}$ – средняя мощность шумов.

Шумы приёмника пропорциональны его полосе пропускания

$$P_{\text{ш прм}} = k \cdot F, \quad (5)$$

где k – коэффициент пропорциональности.

Принимая, что шумы внешних источников пренебрежительно малы по сравнению с шумами приёмника, положим $P_{\text{ш}} = P_{\text{ш прм}}$. Тогда $P_{\text{ш}} = k \cdot F$.

Подставляя выражение (4), получим

$$P_{\text{ш}} = k \frac{C}{\log_2 (1 + P_c / P_{\text{ш}})}. \quad (6)$$

Подставляя полученное выражение для $P_{ш}$ в формулу (2), имеем

$$R_{\max} = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_{\text{ПРД}} \cdot G_{\text{ПРД}} \cdot G_{\text{ПРМ}} \cdot \eta_{\text{ПРД}} \cdot \eta_{\text{ПРМ}} \cdot L_0 \cdot N \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P_c}{P_{ш}} \right)}{k \cdot C \cdot \left(\frac{P_c}{P_{ш}} \right)_{\min}}}. \quad (7)$$

Формула (7) связывает энергетические и информационные характеристики радиолинии. Из неё следует, что при изменении дальности до КА (R_{\max}) скорость передачи информации (C) при неизменных всех прочих параметрах радиолинии может изменяться. Такие системы, параметры и структура которых изменяются на основе текущей информации с целью достижения оптимального, по некоторому критерию, состояния, принято называть адаптивными.

Пути реализации адаптивной системы передачи информации.

Появление семейства космических аппаратов (КА), использующих автономные системы навигации с использованием сигналов космических навигационных систем GPS и «Глонасс», открывает широкие возможности реализации адаптивных систем путём изменения скорости передачи информации в соответствии с расстоянием между КА и пунктом приёма.

Автономные системы навигации, устанавливаемые на КА, используют сигналы GPS и (или) «Глонасс» [5]. При этом предпочтительны те из них, которые используют сигналы обеих систем: при пропадании сигналов какой-либо навигационной системы или невозможности их применения они автоматически продолжают работу по другой СНС. Выходной информацией, формируемой АСН, являются [5]: текущие координаты (в Гринвичской системе координат) x_i , y_i , z_i ; составляющие вектора скорости V_x , V_y , V_z ; текущее значение времени (UTC).

Пусть координаты пункта приёма информации (x_0 , y_0 , z_0). Тогда текущее расстояние до КА составит

$$R_i = \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2 + (z_0 - z_i)^2}. \quad (8)$$

Из (1) получаем выражение для мощности сигнала на входе ПРМ при R_i :

$$P_{c_i} = \frac{P_{\text{ПРД}} \cdot G_{\text{ПРД}} \cdot G_{\text{ПРМ}} \cdot \eta_{\text{ПРД}} \cdot \eta_{\text{ПРМ}} \cdot L_0 \cdot N \cdot \lambda^2}{(4\pi R_i)^2}. \quad (9)$$

Подставляя в (4) вместо P_c текущее значение расстояния P_{C_i} , получим $C_i = f(R_i)$ при условии, что остальные параметры радиолинии неизменны:

$$C_i = F \cdot \log_2 \left[1 + \frac{P_{\text{ПРД}} \cdot G_{\text{ПРД}} \cdot G_{\text{ПРМ}} \cdot \eta_{\text{ПРД}} \cdot \eta_{\text{ПРМ}} \cdot L_0 \cdot N \cdot \lambda^2}{P_{ш} \cdot (4\pi R_i)^2} \right]. \quad (10)$$

R_i в ходе сеанса связи может изменяться в довольно широких пределах: от $\sqrt{H^2 + 2HR_3}$ при угле места 0° , до H при угле места 90° (рис. 1).

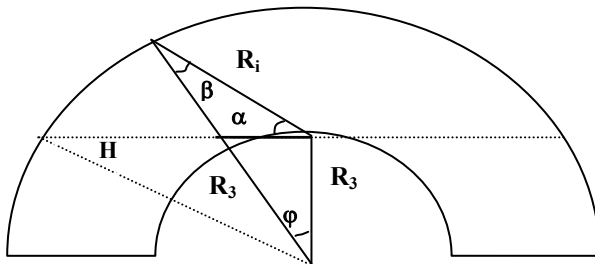


Рис. 1. Изменение R_i в ходе сеанса

По теореме синусов:

$$\frac{R_3}{\sin \beta} = \frac{R_3 + H}{\sin (90^\circ + \alpha)} \Rightarrow \sin \beta = \frac{R_3 \sin (90^\circ + \alpha)}{R_3 + H};$$

$$\beta = \frac{360}{2\pi} \cdot \arcsin \frac{R_3 \cos \alpha}{R_3 + H};$$

$$\varphi = 180^\circ - (90^\circ + \alpha) - \beta = 90^\circ - \alpha - \beta.$$

Тогда: $R_i = \frac{R_3 \cdot \sin \varphi}{\sin \beta}$ или $R_i = \frac{(R_3 + H) \cdot \sin \varphi}{\cos \alpha}$.

По теореме косинусов:

$$R_i = \sqrt{R_3^2 + (R_3 + H)^2 - 2R_3(R_3 + H) \cdot \cos \varphi}.$$

Для круговой орбиты с $H = 700$ км изменения R_i могут принимать значения от 3000 до 700 км, а скорость передачи информации может увеличиваться более чем в 4 раза.

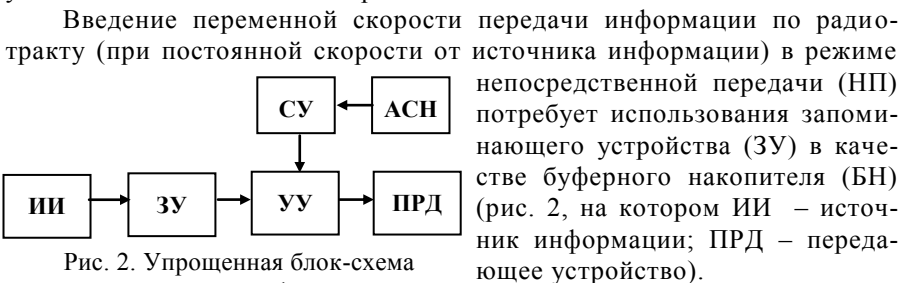


Рис. 2. Упрощенная блок-схема передачи информации

С выхода источника информа-

ции сигнал поступает в буферное запоминающее устройство. Устройство управления (УУ) осуществляет считывание информации из ЗУ со скоростью, определяемой системой управления (СУ) по расстоянию R_i , рассчитываемому по данным сигналов автономной системы навигации (АСН) и координатам пункта приёма (8). В режиме воспроизведения (ВП) информация из ЗУ с переменной скоростью, регулируемой по сигналам АСН системой управления, поступает на передающее устройство.

Возможен совмещённый режим работы радиолинии (НП + ВИ) при наступлении условий для двукратного увеличения скорости передачи информации.

Этот режим работы особенно эффективен в условиях ограниченного количества сеансов связи с КА, что характерно для низкоорбитальных КА ДЗЗ и однопунктной технологии управления.

Наиболее сложное устройство – демодулятор, обеспечивающий демодуляцию и декодирование информационных потоков с оперативной перестройкой скорости поступления данных.

Теория оптимального приёма показывает, что демодуляторы с угловой (фазовой или частотной) модуляцией представляют собой устройства, в которых осуществляется слежение за мгновенной частотой или фазой принятого сигнала. Это устройства с обратной связью (рис. 3), содержащие перестраиваемый генератор (ПГ),

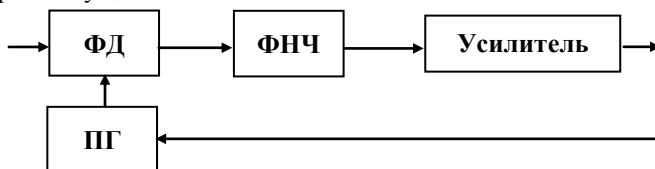


Рис.3. Структурная схема оптимального приёмника сигналов с угловой модуляцией

фазовый детектор (ФД), линейный фильтр нижних частот (ФНЧ) и усилитель, соединённые между собой так, что они образуют кольцо.

В целом эффективность радиотракта характеризуется несколькими критериями, так или иначе взаимосвязанными со скоростью передачи информации [2]:

β -эффективность – критерий использования мощности сигнала:

$$\beta = \frac{P_c}{C \cdot \sigma^2}, \quad (11)$$

где P_c – мощность сигнала на входе; C – скорость передачи информации, $\frac{\text{дв. ед.}}{\text{сек}}$; $\sigma^2 = \frac{P_{\text{ш вх}}}{F_{\text{вх}}}$, где $P_{\text{ш вх}}$ – мощность шумов на входе приёмника; $F_{\text{вх}}$

– входная полоса приёмника

или

$$\beta = \left(\frac{P_c}{P_{ш}} \right)_{вх} \cdot \frac{F_{вх}}{C}. \quad (12)$$

Если отношение $\frac{F_{вх}}{C}$ принять за критерий использования полосы частот канала, т.е. γ -эффективность

$$\gamma = \frac{F_{вх}}{C}, \quad (13)$$

то тогда

$$\beta = \left(\frac{P_c}{P_{ш}} \right)_{вх} \cdot \gamma. \quad (14)$$

Выводы. Предлагаемый адаптивный метод повышения эффективности радиолиний космических систем выбором рациональной (в зависимости от дальности до КА) скорости передачи информации может быть использован в высокоскоростных каналах связи «борт-Земля» космических систем ДЗЗ, оснащённых автономными системами навигации (АСН), особенно в условиях ограничений на количество сеансов связи с КА.

Следует, однако, отметить, что скорость передачи информации C и допустимая величина отношения $\left(\frac{P_c}{P_{ш}} \right)_{\min}$ в значительной степени зависят от выбранного метода модуляции и требуемого качества передаваемой информации (вероятности ошибки или достоверности).

В любом случае, исходя из теории информации и формулы Шеннона, при скорости передачи информации C , меньшей пропускной способности C_{\max} , существует принципиальная возможность передачи информации с вероятностью ошибки, меньшей любой наперёд заданной величины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Назаров Л.Е. Применение искусственных нейронных сетей для сжатия РСА и сканерных изображений Земной поверхности // Исслед. Земли из космоса. – 1999. – № 5. – С. 44 - 50.
2. Агаджанов П.А., Горшков Б.М., Смирнов Г.Д. Основы радиотелеметрии. – М.: Воениздат, 1971. – 248 с.
3. Мельник Ю.А., Стогов Г.В. Основы радиотехники и радиотехнические устройства. – М.: Сов. радио, 1973. – 368 с.
4. Стейн С., Джонс Дж. Принципы современной теории связи и их применение к передаче дискретных сообщений. – М.: Связь, 1971 - 376 с.
5. Мещеряков И.В. В мире космонавтики. – Н. Новгород : Русский купец, 1996. – 368 с.

Поступила 17.07.2002

ЗАГОРУЛЬКО Александр Николаевич, зам. нач. ЦУП. В 1979 году окончил ХВВКИУ. Область научных интересов – радиотехника.
