

Исследование влияния внутрисистемной помехи множественного доступа в модели радиоканала группового управления космическими аппаратами

В. С. Куликов

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского

Аннотация. В статье рассмотрены процессы формирования сигналов группового управления с множественным доступом с кодовым разделением каналов. Описан процесс возникновения помехи множественного доступа. Проведено исследование воздействия помехи множественного доступа в радиоканале группового управления множеством объектов.

Ключевые слова: групповое управление, кодовое разделение каналов, помеха множественного доступа

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одним из ведущих направлений развития космической деятельности является разработка многоспутниковых космических систем на основе малых космических аппаратов (КА) (массой от 100 кг до 500 кг), преимущество располагающихся на низких орбитах до 2000 км. Данные космические системы являются новым классом космических объектов, основными решаемыми задачами которых являются дистанционное зондирование Земли и предоставление услуг связи.

За рубежом в активной фазе реализации проекты космических систем, включающие в себя сотни (OneWeb, Dove) и тысячи КА (Starlink) [1]. В Российской Федерации разработка многоспутниковых космических систем ведется в соответствии с Федеральной целевой программой «Сфера», в рамках которой предусматривается создание орбитальной группировки «Марафон-IoT», численность 264 КА [2]. Также в настоящее время развёртывается коммерческая орбитальная группировка «Рассвет», численностью 900 КА.

Значительное увеличение численности орбитальной группировки создаёт необходимость увеличения пропускной способности наземного комплекса управления КА. Одним из способов повышения пропускной способности является разработка радиоэлектронных систем управления (РЭСУ) КА, реализующих технологию группового управления (ГУ).

Под ГУ подразумевается одновременная передача управляющих воздействий на несколько КА, находящихся в зоне радиовидимости РЭСУ КА.

Одним из преимуществ ГУ КА по сравнению с другими технологиями управления, такими как управление с ретрансляцией, сетевое и кластерное управление, является отсутствие необходимости размещения дополнительной аппаратуры, формирующей

межспутниковые каналы передачи информации, а также возможность впоследствии использовать гибридные технологии управления, объединяющие в себе существующие.

Для эффективной реализации ГУ необходимо формирование сигнальной конструкции, позволяющей осуществить множественный доступ с кодовым разделением каналов с задействованием всего выделенного частотного диапазона на всём интервале времени нахождения в зоне радиовидимости. Для эффективной реализации множественного доступа с кодовым разделением сигналов необходим выбор такого ансамбля ортогональных двоичных последовательностей, объём которого будет превышать количество управляемых объектов, а влияние внутрисистемной помехи множественного доступа (ПМД) не приведёт к возникновению ошибки при управлении КА.

II. МОДЕЛЬ ВНУТРИСИСТЕМНОЙ ПОМЕХИ МНОЖЕСТВЕННОГО ДОСТУПА

Возникновение ПМД в радиолинии «РЭСУ – КА» при реализации технологии ГУ связано с необходимостью уплотнения сигналов, сформированных в каналах управления КА.

Одним из способов уплотнения каналов является нелинейное кодовое уплотнение [3], которое также называется мажоритарным [4]. Достоинством данного способа уплотнения является отсутствие необходимости использования автоматической регулировки уровня сформированного группового сигнала, которое неэффективно при решении задач информационного обмена с КА.

Представим множество команд управления $a_{i,j}$, поступающих в РЭСУ как матрицу \mathbf{a} , а ансамбль ортогональных двоичных последовательностей \mathbf{b} , как матрицу \mathbf{b} , где $b_{v,l}$ – двоичный элемент последовательности.

$$\mathbf{a} = \begin{pmatrix} \mathbf{a}_1 \\ \mathbf{a}_2 \\ \dots \\ \mathbf{a}_k \\ \mathbf{a}_K \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{1,1}, a_{1,2}, \dots, a_{1,J} \\ a_{2,1}, a_{2,2}, \dots, a_{2,J} \\ \dots \\ a_{k,1}, a_{k,2}, \dots, a_{k,J} \\ a_{K,1}, a_{K,2}, \dots, a_{K,J} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\mathbf{b} = \begin{pmatrix} \mathbf{b}_1 \\ \mathbf{b}_2 \\ \dots \\ \mathbf{b}_k \\ \mathbf{b}_k^* \\ \mathbf{b}_V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_{1,1}, b_{1,2}, \dots, b_{1,L} \\ b_{2,1}, b_{2,2}, \dots, b_{2,L} \\ \dots \\ b_{k,1}, b_{k,2}, \dots, b_{k,L} \\ b_{k,1}^*, b_{k,2}^*, \dots, b_{k,L}^* \\ b_{V,1}, b_{V,2}, \dots, b_{V,L} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

Тогда, если $\mathbf{c} = (\mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2, \dots, \mathbf{c}_k, \mathbf{c}_K)$ – закодированные команды управления, сформированные в каналах управления, где $\mathbf{c}_i = (c_{i,1}, c_{i,2}, \dots, c_{i, JL})$ – вектор закодированных команд управления в каждом канале, где $c_{i,jl} = \{-1, 1\}$ – информационный символ:

$$\mathbf{c} = \begin{pmatrix} \mathbf{c}_1 \\ \mathbf{c}_2 \\ \dots \\ \mathbf{c}_k \\ \mathbf{c}_K \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{1,1}, c_{1,2}, \dots, c_{1, JL} \\ c_{2,1}, c_{2,2}, \dots, c_{2, JL} \\ \dots \\ c_{k,1}, c_{k,2}, \dots, c_{k, JL} \\ c_{K,1}, c_{K,2}, \dots, c_{K, JL} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

$$c_{i,jl} = \begin{cases} a_{i,j} b_{i,l}, & \text{при } a_{i,j} = 1 \\ a_{i,j} b_{i,l}^*, & \text{при } a_{i,j} = 0 \end{cases}$$

Тогда, при нелинейном кодовом уплотнении последовательность ГУ \mathbf{d} формируется следующим образом:

$$\mathbf{d} = (d_1, d_2, \dots, d_{JL}), \quad d_{jl} = \text{sign} \sum_{i=1}^K c_{i,jl} \quad (4)$$

где $\text{sign } x$ – функция предельного ограничения группового сигнала:

$$\text{sign} x = \begin{cases} 1 & \text{при } x > 0 \\ -1 & \text{при } x < 0 \end{cases} \quad (5)$$

Если в выражении (2) \mathbf{b}_k – последовательность, используемая для кодирования информационного символа «1», а \mathbf{b}_k^* – последовательность, используемая для кодирования информационного символа «-1», то значение основного пика корреляционной функции в нормированном виде:

$$\begin{aligned} \rho(\mathbf{b}_k, \mathbf{d}_k) &< 1, \text{ при } K > 1 \\ \rho(\mathbf{b}_k^*, \mathbf{d}_k) &< 1, \text{ при } K > 1 \end{aligned} \quad (6)$$

При увлечении количества уплотнённых каналов K , значение величины основного пика будет уменьшаться, что в свою очередь будет приводить к ухудшению помехоустойчивости сигнала ГУ.

Так как наиболее помехоустойчивой модуляцией сигнала является двоичная фазовая манипуляция, для исследования влияния ПМД, для исследования помехоустойчивости предлагается рассматривать BPSK.

$$P_o = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) \quad (7)$$

где: E_b/N_0 – отношение энергии бита к спектральной плотности мощности шума, $Q(x)$ – интеграл Гаусса.

Энергия сигнала определяется следующим образом [5]:

$$E_b = \int_0^T s'^2(t) dt = \sum_{n=1}^N d'^2(n), \text{ при } d' = b_k, K = 1 \quad (8)$$

$$E_b = \int_0^T s_k(t) s'(t) dt = \sum_{n=1}^N b_k(n) d'(n), \text{ при } d' \neq b_k, K > 1 \quad (9)$$

где: $d'(n)$ – принятая реализация сигнала ГУ $d(n)$.

Из выражения (9) можно сделать вывод, что уплотнение каналов приводит к распределению энергии E_b между каналами управления, следовательно, влияние ПМД можно оценить следующим образом:

$$P_o = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0 K_{ПМД}}}\right) \quad (10)$$

где: $K_{ПМД}$ – коэффициент уменьшения энергии сигнала k -го КА, определяемый как среднее значение минимального основного пика корреляционной функции сигналов \mathbf{b}_k и \mathbf{d}' ρ_{\min} и максимального бокового пика ρ_{\max} .

$$K_{ПМД} = \frac{2L}{\rho_{\min \text{ о.п}} + \rho_{\max \text{ б.п}}} \quad (11)$$

Выражение (11) позволяет вычислить помехоустойчивость сигнала ГУ при влиянии внутрисистемной ПМД. Значения ρ_{\max} и ρ_{\min} для различного количества уплотнённых каналов и при различных используемых ортогональных ансамблей двоичных последовательностей будут отличаться, поэтому для исследования воздействия ПМД в радиоканале ГУ необходимо проведение имитационного моделирования, которое будет включать формирование ансамбля ортогональных последовательностей, уплотнение необходимого количества каналов и последующее вычисление корреляционных функций.

III. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНУТРИСИСТЕМНОЙ ПОМЕХИ МНОЖЕСТВЕННОГО ДОСТУПА В РАДИОКАНАЛЕ ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ

Для исследования влияния ПМД в радиоканале ГУ был выбран циклически замкнутый ансамбль двоичных последовательностей Кердока длины $L = 1022$, как наиболее мощный из известных минимаксных ансамблей ортогональных двоичных последовательностей [6].

В табл.1 и на рис.1 представлены значения минимального основного пика корреляционной функции и максимального бокового пика, нормированные к длине L .

ТАБЛИЦА I. ЗНАЧЕНИЯ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ПИКОВ ПРИ УПЛОТНЕНИИ КАНАЛОВ

Количество каналов	Высота основного пика	Высота бокового пика	Порог
1	1	0,08	0,54
3	0,47	0,1	0,29
5	0,34	0,11	0,27
7	0,27	0,11	0,23
9	0,23	0,11	0,17
11	0,2	0,11	0,16
13	0,17	0,12	0,15
15	0,16	0,12	0,14

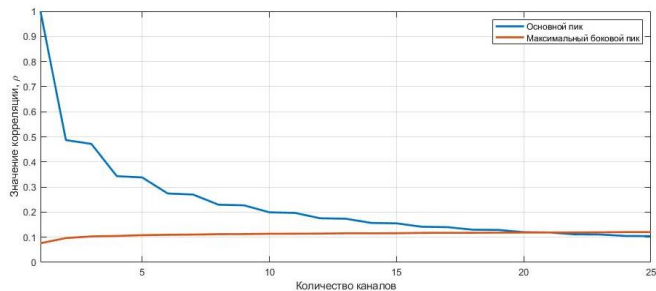


Рис. 1. Значения корреляционных пиков при уплотнении каналов

Из рис. 1 следует, что уплотнение чётного количества каналов нецелесообразно, так как существует возможность уплотнить на один канал больше при тех же значениях корреляционных пиков. Исследование помехоустойчивости сигнала ГУ при влиянии ПМД представлено на рис. 2.

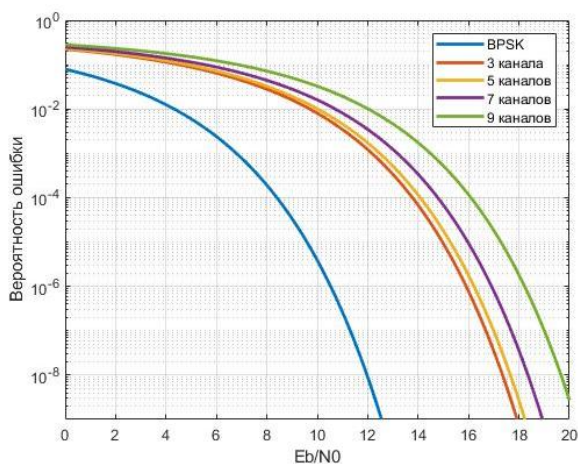


Рис. 2. Исследование помехоустойчивости при влиянии помехи множественного доступа

Из рис. 2 следует, что кодовое уплотнение значительно влияет на помехоустойчивость группового сигнала. Так, для достижения вероятности битовой ошибки 10^{-7} необходимо увеличение энергии бита на 5 дБ при уплотнении трёх каналов, на 6 дБ при уплотнении 7 каналов и на 8 дБ при уплотнении 9 каналов.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развёртывание многоспутниковых космических систем требует применения новых технологий управления КА, позволяющих повысить пропускную способность НКУ.

В ситуациях, когда рассматривается управление малыми КА и отсутствует возможность размещения на КА дополнительной аппаратуры для формирования межспутниковых радиолиний, наиболее эффективным является применение технологии ГУ КА с применением множественного доступа с кодовым разделением сигналов.

Для эффективной реализации множественного доступа при ГУ необходимо обеспечение воздействия внутрисистемной ПМД, не превышающего требуемого значения. Это возможно при выборе минимаксного ансамбля ортогональных двоичных последовательностей.

Несмотря на необходимость увеличения энергии сигнала на 5–8 дБ при уплотнении от трёх до девяти каналов для достижения требуемого уровня помехоустойчивости, технология ГУ позволит увеличить количество одновременно управляемых КА до девяти соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Наумочкин Д.В., Петухов А.И., Полуян М.М. Анализ тенденций развития сверхмалых космических аппаратов // Вооружение и экономика. 2019. вып 4. С. 37-43.
- [2] Потюпки А.Ю., Волков С.А., Тимофеев Ю.А. Перспективные сервисы многоспутниковых космических систем // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2021. Т. 8, вып. 1. С. 59-68.
- [3] Варакин Л.Е. Теория систем сигналов. М.: Сов. радио, 1978. 304 с.
- [4] Гридин В.Н., Мазепа Р.Б., Рошин Б.В. Мажоритарное плотнение и кодирование двоичных сигналов. М.: Наука, 2001. 124 с.
- [5] Тараненко П.Г. Псевдослучайные и кодовые последовательности: методы синтеза и анализа. СПб.: ВИКУ им. А.Ф. Можайского, 1999. 112 с.
- [6] Гайворонский Д.В., Ипатов В.П. и др. К выбору сигнатурных ансамблей для нового поколения радиointерфейса системы ГЛОНАСС // Известия вузов России. Радиоэлектроника. Вып. 6. С. 44-55.