

М. Е. ИЛЬЧЕНКО<sup>1</sup>, Т. Н. НАРЫТНИК<sup>1,2</sup>, В. И. ПРИСЯЖНЫЙ<sup>3</sup>,  
С. В. КАПШТЫК<sup>3</sup>, С. А. МАТВИЕНКО<sup>4</sup>

<sup>1</sup> *Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», Украина*

<sup>2</sup> *СП «Институт электроники и связи Украинской академии наук», Украина*

<sup>3</sup> *Национальный центр управления и испытаний космических средств, Украина*

<sup>4</sup> *Научно-производственный комплекс «Курс», Украина*

## ПРИМЕНЕНИЕ СТАНДАРТА ШИРОКОПОЛОСНОГО ДОСТУПА IEEE 802.16 ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЗАИМНОГО ПОЛОЖЕНИЯ КУБСАТОВ В СОСТАВЕ LEGA-SAT

*Рассмотрена возможность оптимизации использования энергетических возможностей платформы кубсата, входящего в состав «распределенного спутника», для повышения производительности его полезной нагрузки. Для оптимизации использования энергетических возможностей предложено в режиме штатной эксплуатации кубсата в «распределенном спутнике» отключать бортовое оборудование командно-телеметрической радиолинии. Для измерения текущих навигационных параметров кубсата в условиях группового полета в составе «распределенного спутника» предложено использовать в качестве исходных данных координаты кубсата в спутниковой системе координат корневого спутника «распределенного спутника» и вектор относительной скорости кубсата относительно корневого спутника. Для определения координат кубсата в спутниковой системе координат предложено использовать методику, основанную на измерениях расстояний между спутниками в «распределенном спутнике» и проекций вектора относительной скорости на эти расстояния. Рассмотрены особенности протоколов сети широкополосного доступа WiMAX IEEE 802.16 для определения возможности выполнения измерений взаимного положения спутников в составе «распределенного спутника» в одном канале с передачей информации. Показано, что использование встроенных средств измерения дальности и доступа мобильных станций в мобильную сеть WiMAX позволяет выполнять измерения расстояния от корневого спутника до конечных спутников – кубсатов в «распределенном спутнике». Для выполнения операций измерения расстояний между конечными спутниками в «распределенном спутнике» предложено использовать «зону конкурентного доступа» субканала восходящей линии в сети WiMAX. Предложена процедура измерения дальности между конечными спутниками, основанная на измерении времени распространения тестового сигнала измерения дальности между назначенными конечными спутниками. Предложена процедура передачи тестового сигнала, учитывающая особенности множественного доступа с ортогональным разделением несущих (OFDMA). Предложенная процедура может быть реализована в варианте сети стандарта IEEE 802.16 для использования в «распределенном спутнике».*

**Ключевые слова:** *Низкоорбитальная спутниковая система, LEO-система, распределенный спутник, Lega-Sat, взаимное положение кубсатов, двумерная матрица расстояний, многомерная матрица углов, сеть широкополосного радиодоступа WiMAX, адаптация стандартов IEEE 802.16.*

### Введение

Низкоорбитальные информационные спутниковые системы (LEO-системы) становятся важной составной частью современной информационной инфраструктуры и используются в таких приложениях, как телекоммуникации, научные исследования, дистанционное зондирование Земли, технологические и демонстрационные эксперименты, учебные программы университетов [1]. Особое внимание уделяется развитию LEO-систем в связи с планами

внедрения Интернета вещей (IoT) во всех его приложениях. Ведущие мировые консорциумы и инвестиционные фонды возлагают на LEO-системы задачи обеспечения связности систем IoT [2].

Одним из направлений развития LEO-систем является создание систем на основе архитектуры «распределенного спутника» [3], или архитектуры Lega-Sat. Архитектура Lega-Sat направлена на использование наноспутников или кубсатов (массой 1–10 кг) для решения многофункциональных сложных задач. Характерной особенностью кубсатов являют-

ся ограниченные массово-габаритные и энергетические возможности платформ. Разработка предложений по повышению эффективности использования кубсатов в сочетании с применением последних достижений в области микроэлектроники, схемотехники и информационных технологий является важным фактором, способствующим расширению области применения этих недорогих космических аппаратов.

Целью данной работы является разработка метода определения взаимного положения кубсатов в составе Lega-Sat и предложений по адаптации стандартов IEEE 802.16 для комплексного использования в Lega-Sat.

### Постановка задачи

Обязательным оборудованием в составе платформы любого космического аппарата является бортовое оборудование командно-измерительной радиолинии (КРЛ). В условиях группового полёта при небольших расстояниях между кубсатами в составе Lega-Sat, которое составляет не более 1000 м, возникают серьёзные проблемы с электромагнитной совместимостью командно-телеметрических радиолиний и точностью измерений параметров орбиты каждого космического аппарата. Кроме того, использование для работы КРЛ всенаправленных или слабонаправленных антенн предполагает достаточно высокую мощность передатчиков КРЛ. Следовательно, КРЛ является одним из основных потребителей бортовой системы энергоснабжения кубсата, от которого нельзя отказаться в течение всего времени его орбитальной эксплуатации. Это приводит к ограничению мощности, направляемой на обеспечение функционирования основной полезной нагрузки кубсата, и, как следствие, приводит к снижению эффективности выполнения всей миссии.

Архитектура Lega-Sat позволяет повысить эффективность использования кубсатов отказавшись от использования части оборудования, необходимого для измерения параметров орбиты и управления орбитальным полётом. Отказ от использования подразумевает отключение части оборудования в условиях штатной эксплуатации кубсата в составе Lega-Sat.

Таким образом, задача поиска путей повышения эффективности использования кубсатов в составе Lega-Sat формулируется следующим образом:

- определить альтернативный существующим метод измерения текущих навигационных параметров (ТНП) кубсатов, который обеспечивает измерения при отключенном состоянии бортовой КРЛ;
- адаптировать технологию широкополосного доступа, используемую для обеспечения связи меж-

ду корневым и окончными космическими аппаратами в Lega-Sat при условии минимизации необходимых изменений/доработок.

### Метод определения текущих навигационных параметров кубсатов в составе Lega-Sat

Измерение ТНП кубсатов в составе Lega-Sat может быть обеспечено путём измерения взаимного положения кубсата, который является окончным спутником в микрогруппировке Lega-Sat, относительно корневого спутника, который как правило относится к классу микроспутника и взаимодействует как с соседними спутниками Lega-Sat в системе, так и с наземным командно-измерительным комплексом [3]. Имея комплект параметров относительного положения, который включает текущие координаты кубсата в спутниковой системе координат корневого спутника, величину и направление относительного вектора скорости кубсата относительно корневого спутника, можно вычислить ТНП кубсата и параметры его орбитального движения.

Определение взаимного положения космических аппаратов в составе Lega-Sat может быть выполнено на основе измерения дальности между космическими аппаратами. Учитывая динамический характер системы космических аппаратов, которые входят в состав Lega-Sat, их постоянное взаимное перемещение, обусловленное влиянием возбуждающих факторов орбитального движения космического аппарата, технология определения взаимного положения может быть условно разделена на две части: статическая и динамическая.

На рис. 1 показан пример измерения взаимных расстояний между космическими аппаратами в Lega-Sat. На рис. 1 Lega-Sat состоит из корневого спутника, номер которого определяется номером Lega-Sat в орбитальной плоскости системы, и пяти окончных спутников, номера которых определяются номером Lega-Sat и номером окончного спутника в микрогруппировке.

Результаты измерений взаимных расстояний позволяют сформировать матрицу взаимных расстояний  $D$ , в данном случае размерности  $6 \times 6$ .

$$D = \begin{bmatrix} 0 & d_{01} & d_{02} & d_{03} & d_{04} & d_{05} \\ d_{01} & 0 & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} \\ d_{02} & d_{12} & 0 & d_{23} & d_{24} & d_{25} \\ d_{03} & d_{13} & d_{23} & 0 & d_{34} & d_{35} \\ d_{04} & d_{14} & d_{24} & d_{34} & 0 & d_{45} \\ d_{05} & d_{15} & d_{25} & d_{35} & d_{45} & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

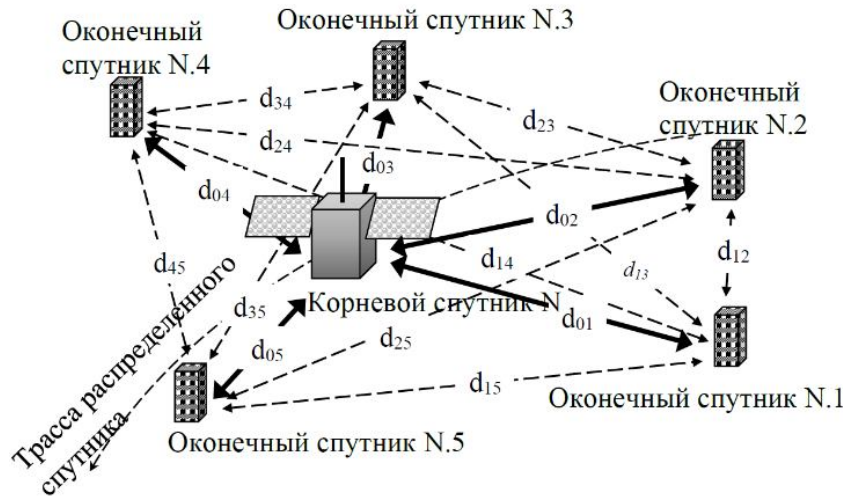


Рис. 1. Измерение взаимных расстояний между в Lega-Sat

В матрице расстояний  $D$  номера строк и столбцов соответствуют номеру космического аппарата в Lega-Sat. Диагональные элементы матрицы принимают значение 0.

Знание расстояний между космическими аппаратами в составе Lega-Sat позволяет рассчитать углы между направлениями от каждого космического аппарата на другие космические аппараты в Lega-Sat (рис. 2).

Расчёт производится на основе теоремы косинусов [4]. К примеру (см. рис. 2), угол  $\alpha_{12}$  между направлениями от корневого спутника  $O$  на оконечные спутники  $N.1$  и  $N.2$  рассчитывается на основе результатов измерения взаимной дальности  $d_{01}$ ,  $d_2$ ,  $d_{12}$  следующим образом

$$\alpha_{12} = \arccos((d_{01}^2 + d_2^2 - d_{12}^2)/2d_{01}d_{02}). \quad (2)$$

На основе двумерной матрицы расстояний  $D$  строится многомерная матрица углов. Для рассмат-

риваемого случая матрица углов  $\Phi$  будет иметь размерность  $5 \times 5 \times 6$ . Слой трёхмерной матрицы для корневого спутника и оконечного спутника  $A$  (см. рис. 2) имеют вид двумерных матриц

$$\Phi_0 = \begin{bmatrix} 0 & \alpha_{12} & \alpha_{13} & \alpha_{14} & \alpha_{15} \\ \alpha_{12} & 0 & \alpha_{23} & \alpha_{24} & \alpha_{25} \\ \alpha_{13} & \alpha_{23} & 0 & \alpha_{34} & \alpha_{35} \\ \alpha_{14} & \alpha_{24} & \alpha_{34} & 0 & \alpha_{45} \\ \alpha_{15} & \alpha_{25} & \alpha_{35} & \alpha_{45} & 0 \end{bmatrix},$$

$$\Phi_A = \begin{bmatrix} 0 & \beta_{02} & \beta_{03} & \beta_{04} & \beta_{05} \\ \beta_{02} & 0 & \beta_{23} & \beta_{24} & \beta_{25} \\ \beta_{03} & \beta_{23} & 0 & \beta_{34} & \beta_{35} \\ \beta_{04} & \beta_{24} & \beta_{34} & 0 & \beta_{45} \\ \beta_{05} & \beta_{25} & \beta_{35} & \beta_{45} & 0 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

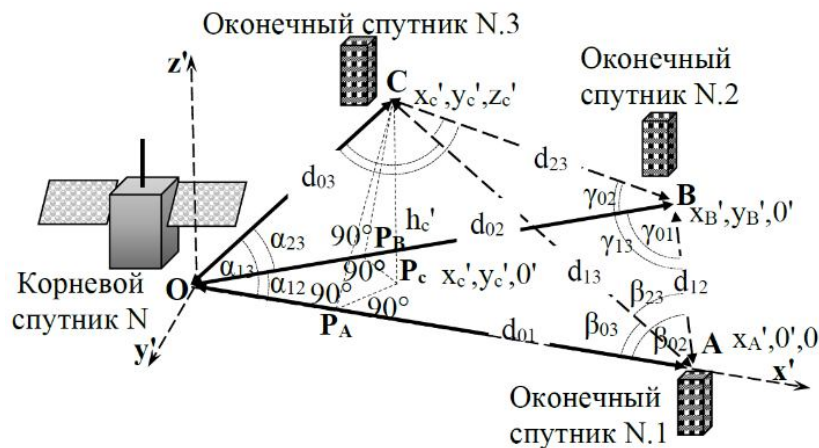


Рис. 2. Определение взаимных углов и координат в промежуточной системе координат оконечных спутников в Lega-Sat

Знание взаимных расстояний и углов между космическими аппаратами в Lega-Sat позволяет построить промежуточную прямоугольную систему координат, центр которой находится в центре масс корневого спутника, и определить координаты всех окончательных спутников в этой системе координат относительно корневого спутника. Анализ элементов матрицы расстояний  $D$  позволяет определить окончательный спутник, наиболее удаленный от корневого спутника. Направление на наиболее удаленный спутник выбирается в качестве первой оси  $x'$  промежуточной системы координат (см. рис. 2). Координаты точки  $A$  окончательного спутника  $N.1$  определяются как  $x'_A, 0, 0$ , где  $x' = d_{01}$ .

Для определения плоскости  $x'Oy'$  выбирается второй наиболее удаленный окончательный спутник (на рис. 2 окончательный спутник  $N.2$ , обозначенный как точка  $B(x'_B, y'_B, 0)$ ). Ось  $y'$  будет находиться в одной плоскости с направлением  $d_{12}$  и перпендикулярна оси  $x'$ . Координаты точки  $B$  в плоскости  $x'Oy'$  рассчитываем на основе дальности  $d_{02}$  и угла  $\alpha_{12}$ .

$$\begin{aligned} x'_B &= d_{02} \cdot \cos\alpha_{12}, \\ y'_B &= d_{02} \cdot \sin\alpha_{12}. \end{aligned} \quad (4)$$

Направление высоты треугольника  $\Delta OBA$  будет параллельно направлению оси  $y'$ . Ось  $z'$  дополняет промежуточную систему координат до полной 3-х мерной.

В построенной переходной системе координат определяются трехмерные координаты всех окончательных спутников относительно корневого спутника. На рис. 2 показано определение координат спутника  $C(x'_C, y'_C, z'_C)$  на основе трехгранной пирамиды  $OABC$ . Основанием пирамиды является  $\Delta OAB$ , который находится в плоскости  $x'Oy'$ . Координаты  $x'_C$ ,

$y'_C$  вершины пирамиды  $C$  определяются как координаты точки  $P_C(x'_C, y'_C, 0)$ , представляющей собою проекцию точки  $C$  на плоскость  $x'Oy'$ . Точка  $P_C$  является пересечением двух перпендикуляров к сторонам  $OA$  и  $OB$ , проведенным из точек пересечения высот треугольников  $\Delta OCA$  и  $\Delta OCB$  со сторонами  $OA$  и  $OB$  соответственно. Эти координаты рассчитываются на основе расстояния  $d_{03}$ , которое является элементом матрицы  $D$ , и двух углов  $\alpha_{13}$  и  $\alpha_{23}$ , которые являются элементами многомерной матрицы  $\Phi$ . Координата  $z'_C$  определяется как высота пирамиды  $h'_C$  и рассчитывается на основе прямоугольных треугольников  $\Delta CP_C P_A$  или  $\Delta CP_C P_B$  для известных значений одного катета и гипотенузы [4].

Переход к спутниковой системе координат с центром в центре масс корневого спутника возможен после проведения сеанса измерений параметров орбиты трех космических аппаратов, выбранных для построения промежуточной системы координат: корневого спутника и двух наиболее удаленных от него окончательных спутников (рис. 3). Измерение параметров движения может проводиться с использованием радиотехнических и/или оптических методов измерений. При использовании радиотехнического метода на время измерений включается бортовое оборудование КРЛ окончательных спутников. Максимальное разнесение в пространстве трех выбранных для измерений космических аппаратов упрощает процедуры измерений и повышает их точность.

В результате измерения параметров орбиты вычисляются углы  $\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z$  между осями  $x', y', z'$  промежуточной и  $x, y, z$  спутниковой системы координат. Переход из промежуточной в спутниковую систему координат осуществляется с использованием направляющих косинусов [4]. В результате координаты всех окончательных спутников в Lega-Sat опре-

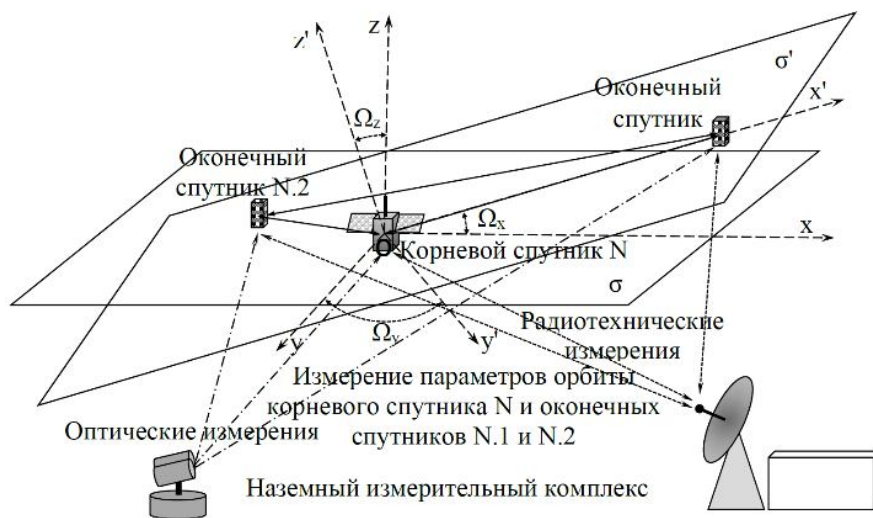


Рис. 3. Переход Lega-Sat из промежуточной в спутниковую систему координат

делены в прямоугольной спутниковой системе координат корневого спутника.

Учитывая постоянное влияние возмущающих факторов на орбитальное движение всех космических аппаратов, входящих в состав «распределенного спутника», важно измерять относительную скорость движения окончательного спутника относительно корневого спутника и определять вектор направления этого относительного движения. Определение вектора относительного движения является динамической частью определения взаимного положения космических аппаратов в составе «распределенного спутника».

Вектор относительной скорости  $\vec{V}_{\text{отн.С}}$  окончательного спутника N.3 относительно корневого спутника O (рис. 4) раскладывается на проекции:  $\text{пр}_{d_{03}} \vec{V}_{\text{отн.}}$ ,  $\text{пр}_{d_{13}} \vec{V}_{\text{отн.}}$ ,  $\text{пр}_{d_{23}} \vec{V}_{\text{отн.}}$  – по трём дальностям  $d_{03}$ ,  $d_{13}$ ,  $d_{23}$ , которые являются ребрами треугольной пирамиды OABC с основанием  $\Delta OAB$  и вершиной в точке C. Каждая проекция представляется как вектор с началом в точке C. Используя известные выражения из аналитической геометрии [5], векторы проекции вектора  $\vec{V}_{\text{отн.С}}$  переносятся в начало координат промежуточной (в данном случае) или спутниковой системы координат. Направление и величина вектора относительной скорости определяется в прямоугольной системе координат как точка пересечения трех плоскостей, построенных перпендикулярно трём перенесённым векторам проекций  $\text{пр}_{d_{03}} \vec{V}_{\text{отн.}}$ ,  $\text{пр}_{d_{13}} \vec{V}_{\text{отн.}}$ ,  $\text{пр}_{d_{23}} \vec{V}_{\text{отн.}}$  – в точках окончания векторов.

### Адаптация сетей широкополосного доступа IEEE 802.16 для проведения измерений

Взаимодействие между корневым и окончательными спутниками в Lega-Sat обеспечивается с помощью беспроводной сети широкополосного доступа

(ШПД). В работе [3] предлагается использовать сеть WiMAX IEEE 802.16.

Помимо высокой скорости передачи информации стандарт IEEE 802.16 обеспечивает измерения расстояния между базовой (BS) и мобильными станциями (MS) [6]. Эти измерения возможны в широком диапазоне скоростей.

Как ранее показано, для определения взаимного положения космических аппаратов в Lega-Sat необходимо провести следующие измерения:

- измерение расстояний между корневым и окончательными и между окончательными спутниками;
- измерение проекций вектора относительной скорости на расстояния между космическими аппаратами.

Для получения максимальной скорости передачи информации в Lega-Sat сеть WiMAX работает в дуплексном режиме с частотным разделением (Frequency Division Duplex, FDD) нисходящей и восходящей линии и с максимальной шириной полосы частот 20 МГц в каждом направлении. Такой режим работы обеспечивает максимальную пропускную способность сети WiMAX [6, 7]. Встроенные алгоритмы первичной инициализации MS в сети WiMAX и периодического измерения дальности позволяют определить расстояние от корневого (BS) до окончательных (MS) спутников.

Для измерения расстояний между окончательными спутниками может использоваться следующий алгоритм.

Субкадр восходящей линии (UL) сети WiMAX в режиме FDD (рис. 5) содержит два слота, предназначенные для запроса первичного соединения, или инициализации MS в сети, и запроса MS полосы. Эти два слота образуют зону конкурентного доступа, поскольку MS отправляют свои запросы случайным образом в пределах выделенных слотов.

Измерения расстояний между окончательными спутниками в Lega-Sat проводятся во временном интервале зоны конкурентного доступа на основе

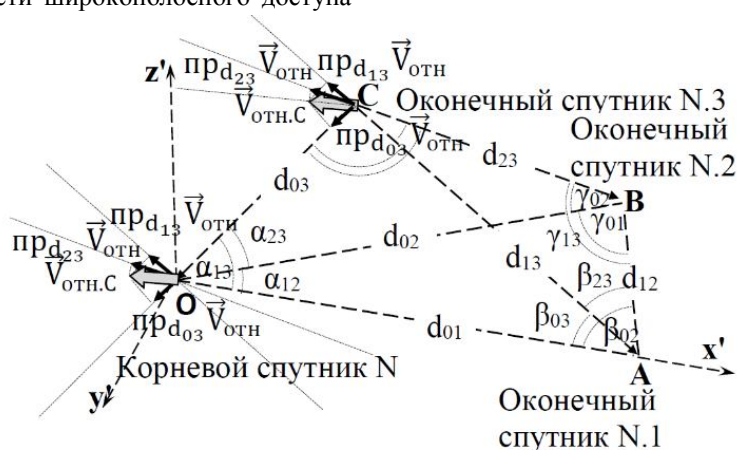


Рис. 4. Определение вектора относительной скорости окончательного спутника

MAC-команды BS, в которой указаны номера оконечных спутников, между которыми необходимо провести измерение.

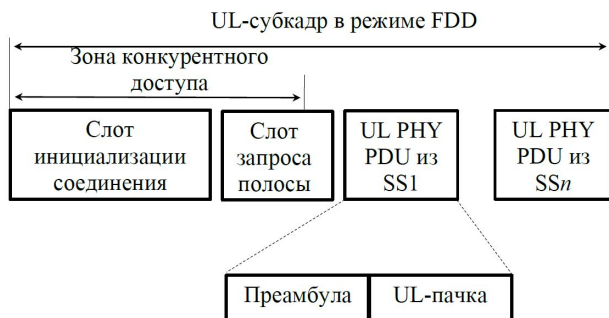


Рис. 5. Структура субкадра восходящей линии в режиме частотного мультиплексирования FDD

На рис. 6 представлена временная диаграмма проведения измерений расстояний между оконечными спутниками в Lega-Sat.

Учитывая, что сеть WiMAX работает с использованием метода множественного доступа на основе ортогональных несущих (OFDMA) и разделения частотных и временных зон [7], для работы каждого оконечного спутника выделяется отдельная полоса частот. При общей ширине канала 20 МГц каждому оконечному спутнику назначается полоса 5 МГц. Корневой спутник, выполняющий функции BS, в пакете широковещательного MAC-сообщения нисходящей линии определяет номер спутника – ретранслятора (на рис. 6 этот спутник обозначен MS-1), инициирующего измерение дальности, и номера спутников –ретрансляторов, участвующих в измерении (на рис. 6 это спутники MS-2, MS-3, MS-4), а также номер сегмента псевдослучайной

последовательности, используемого для проведения измерений. Стандарты группы IEEE 802.16 предполагают использование в качестве сигнала измерения дальности сегментов последовательности Задова-Чу [7].

Измерение расстояния между оконечными спутниками производится на основе измерения задержки на распространение зондирующего сигнала. Оконечный спутник, инициирующий измерение расстояния (на рис. 6 спутник MS-1), в своей полосе частот UL-1 излучает зондирующий сигнал R1. Зондирующий сигнал принимается приемниками оконечных спутников MS-2, MS-3, MS-4. Принимающие оконечные спутники осуществляют корреляционную обработку принятого сигнала в частотной области. При фиксации факта получения зондирующего сигнала R1' оконечные спутники переизлучают сигналы R1-2, R1-3, R1-4 в назначенных им полосах частот UL-2, UL-3, UL-4 соответственно. Корневой спутник осуществляет независимый прием сигналов R1-2', R1-3', R1-4' в полосах частот оконечных спутников UL-2, UL-3, UL-4 соответственно.

Корневой спутник, используя процедуры синхронизации сети WiMAX, имеет информацию о моменте времени начала оконечным спутником MS-1 процедуры измерения расстояний. Корневой спутник определяет расстояние между оконечными спутниками следующим образом. До начала процедуры измерения расстояний между оконечными спутниками корневой спутник имеет информацию о расстоянии до каждого оконечного спутника, которую получает на основе штатных для сети WiMAX процедур периодического измерения дальности BS-MS. Корневой спутник фиксирует момент приё-

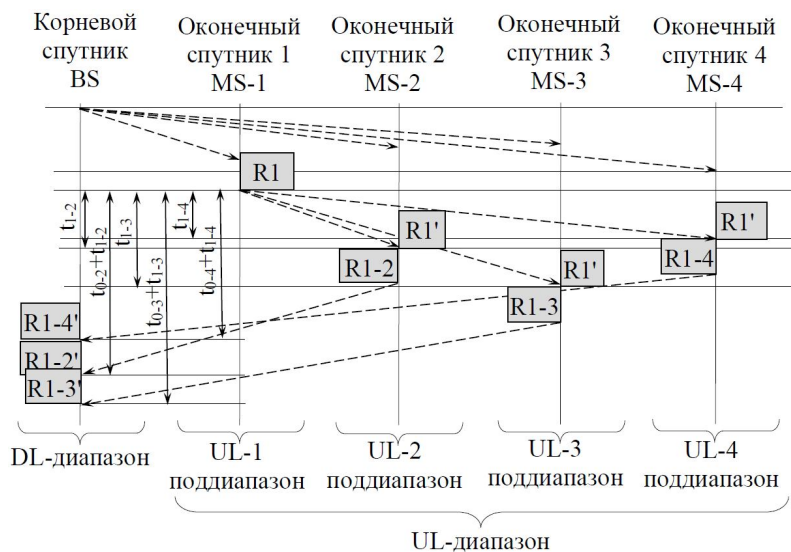


Рис. 6. Диаграмма проведения измерений расстояний между оконечными спутниками

ма сигналов R1-2', R1-3', R1-4'. Расстояние между оконечными спутниками определяется как разность между временем приема соответствующего сигнала R1-2', R1-3', R1-4' и временем, соответствующим расстоянию до каждого оконечного спутника. Так, для показанных на рис. 6 спутников – ретрансляторов

$$\begin{aligned} t_{1-2} &= t_{R1-2'} - t_{0-2}, \\ d_{12} &= t_{1-2} \cdot c, \\ t_{1-3} &= t_{R1-3'} - t_{0-3}, \\ d_{13} &= t_{1-3} \cdot c, \\ t_{1-4} &= t_{R1-4'} - t_{0-4}, \\ d_{14} &= t_{1-4} \cdot c, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $t_{0-2}$ ,  $t_{0-3}$ ,  $t_{0-4}$  – время, соответствующее расстоянию от BS до оконечных спутников MS-2, MS-3, MS4,  $c$  – скорость света.

К достоинствам последовательностей Задова-Чу, используемым в сетях WiMAX для измерения дальности, относится тот факт, что в результате выполнения над сегментом последовательности Задова-Чу операции быстрого преобразования Фурье (БПФ), полученная последовательность отсчетов в частотной области также является последовательностью Задова-Чу [8]. Использование этого свойства и применение корреляционной обработки результатов БПФ позволяет определить Доплеровский сдвиг  $\Delta f_d$  для каждого принятого сигнала R1':  $\Delta f_{d1-2}$ ,  $\Delta f_{d1-3}$ ,  $\Delta f_{d1-4}$ . Значения полученных оценок Доплеровского сдвига частоты передаются на корневой спутник BS оконечными спутниками MS-2, MS-3, MS-4 в пакете отчета о проведении измерений. Полученная информация используется для оценки проекции вектора относительной скорости спутника-ретранслятора MS-1 на линии дальности с соседними спутниками – ретрансляторами (см. рис. 4).

### Заключение

Архитектура Lega-Sat позволяет построить сложные многофункциональные ЛЕО-системы на базе космических аппаратов класса кубсат. Предлагаемые методы отключения части бортового оборудования в режиме штатной эксплуатации кубсата в составе Lega-Sat позволяют оптимизировать использование энергетических возможностей платформы кубсат.

При штатной эксплуатации кубсата в Lega-Sat бортовое оборудование КРЛ кубсата отключается. Измерение ТНП выполняются на основе измерений

расстояний между космическими аппаратами в Lega-Sat с использованием модифицированных протоколов сети WiMAX. Полученные данные являются исходными для расчета параметров орбитального движения каждого космического аппарата.

Для обеспечения измерений расстояний между космическими аппаратами в Lega-Sat сеть WiMAX должна быть адаптирована путем добавления команд MAC-уровня, которые регулируют проведение сеансов измерения расстояний между оконечными спутниками, или MS. Такое решение позволяет комплексно и комплексно использовать потенциальные возможности сети WiMAX для обеспечения функционирования Lega-Sat и избежать установки дополнительного оборудования в результате чего обеспечивается минимизация, массы космических аппаратов и оптимизируется их энергопотребление.

### Литература

1. Prasad, V. *SmallSat Launch Market to Soar Past \$62 Billion by 2030* [Электронный ресурс] / Vivek Suresh Prasad // ViaSatellite DIGITAL – Режим доступа: <http://interactive.satellitetoday.com/via/july-2018/smallsat-launch-market-to-soar-past-62-billion-by-2030/> – 07.05.2018.
2. Curcio, B. *Thinking at a Systems Level* [Электронный ресурс] / Blaine Curcio. – Режим доступа: <https://www.linkedin.com/pulse/thinking-systems-level-blaine-curcio/> – 7.05.2018.
3. *Создание архитектуры «Распределенного спутника» для низкоорбитальных информационно-телекоммуникационных систем на основе группировки микро- и наноспутников* [Текст]. / М. Е. Ильченко, Т. Н. Нарытник, Б. М. Рассомакин, В. И. Присяжный, С. В. Капитык // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2018. – № 2 (146). – С. 33-43.
4. *Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов* [Текст] / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – 13-е изд., исправленное. – М. : Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 544 с.
5. Привалов, И. И. *Аналитическая геометрия*. [Текст] / И. И. Привалов. – Издание тридцатое, стереотипное. – М. : Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1966. – 272 с.
6. Вишневский, В. М. *Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G* [Текст] / В. М. Вишневский, С. Л. Портной, И. В. Шахнович. – М. : Техносфера, 2009. – 472 с.
7. Sassan, Ahmadi. *Mobile WiMAX: A Systems Approach to Understanding IEEE 802.16m Radio Access Technology* [Text] / Ahmadi Sassan. – Elsevier Inc., 2011. – 722 p.
8. Лазарев, В. О. *Исследование ZC-последовательностей, используемых в стандарте LTE* [Текст] / В. О. Лазарев, А. Е. Рыжков // *Информа-*

ційні технології і телекомунікації. – 2016. – Т. 4, № 1. – С. 79-86.

## References

1. Prasad, Vivek Suresh. SmallSat Launch Market to Soar Past \$62 Billion by 2030. *ViaSatellite DIGITAL*. July 2018. Available at: <http://interactive.satellitetoday.com/via/july-2018/smallsat-launch-market-to-soar-past-62-billion-by-2030/> (accessed 7.05.2018).
2. Curcio, Blaine. *Thinking at a Systems Level*. Available at: <https://www.linkedin.com/pulse/thinking-systems-level-blaine-curcio/> (accessed 7.05.2018).
3. Ilchenko, M., Narytnik, N., Rassomakin, B., Prisyazhny, V., Kapshtyk, S. Creation of the architecture of "Distributed Satellite" for low-orbit information-telecommunication systems based on the grouping of micro and nano satellites. *Aviacijno-kosmicna tehnika i*

*tehnologia - Aerospace technic and technology*, 2018, no. 2 (146), pp. 33-43. (In Russian).

4. Bronstein, I., Semendyaev, K. *A handbook on mathematics for engineers and students of technical colleges*. Moscow, Nauka, Ch. Ed. fiz.-mat. lit. Publ., 1986. 544 p. (In Russian).
5. Privalov, I. *Analytic geometry. Edition thirtieth, stereotyped*. Moscow, Nauka, Ch. Ed. fiz.-mat. lit. Publ., 1966. 272 p. (In Russian).
6. Vishnevsky, V., Portnoy, S., Shakhnovich, I. *Encyclopedia of WiMAX. The path to 4G*. Moscow, Technosphere Publ., 2009. 472 p. (In Russian).
7. Sassan, Ahmadi. *Mobile WiMAX. A Systems Approach to Understanding IEEE 802.16m Radio Access Technology*. Elsevier Inc., 2011. 722 p.
8. Lazarev, V. O., Ryzhkov, A. E. Study of ZC-sequences used in the LTE standard. *Information technology and telecommunications*, 2016, vol. 4, no. 1, pp. 79-86. (In Russian).

Поступила в редакцію 20.05.2018, рассмотрена на редколлегии 7.08.2018

## ЗАСТОСУВАННЯ СТАНДАРТУ ШИРОКОСМУГОВОГО ДОСТУПУ IEEE 802.16 ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ВЗАЄМНОГО ПОЛОЖЕННЯ КУБСАТІВ У СКЛАДІ LEGA-SAT

*М. Ю. Ільченко, Т. М. Наритник, В. І. Присяжний,  
С. В. Капитик, С. А. Матвієнко*

Розглянуто можливість оптимізації використання енергетичних можливостей платформи кубсата, що входить до складу «розподіленого супутника», для підвищення продуктивності його корисного навантаження. Для оптимізації використання енергетичних можливостей запропоновано в режимі штатної експлуатації кубсата в «розподіленому супутнику» відключати бортове обладнання командно-телеметричної радіолінії. Для вимірювання поточних навігаційних параметрів кубсата в умовах групового польоту в складі «розподіленого супутника» запропоновано використовувати в якості вихідних даних координати кубсата в супутниковій системі координат кореневого супутника «розподіленого супутника» і вектор відносної швидкості кубсата щодо кореневого супутника. Для визначення координат кубсата в супутниковій системі координат запропоновано використовувати методичку, засновану на вимірах відстаней між супутниками в «розподіленому супутнику» і проекції вектора відносної швидкості на ці відстані. Розглянуто особливості протоколів мережі ширококутового доступу WiMAX IEEE 802.16 для визначення можливості виконання вимірювань взаємного положення супутників в складі «розподіленого супутника» в одному каналі з передачею інформації. Показано, що використання вбудованих засобів вимірювання дальності і доступу мобільних станцій в мобільну мережу WiMAX дозволяє виконувати вимірювання відстані від кореневого супутника до кінцевих супутників - кубсатов в «розподіленому супутнику». Для виконання операцій вимірювання відстаней між кінцевими супутниками в «розподіленому супутнику» запропоновано використовувати «зону конкурентного доступу» субкадра висхідної лінії в мережі WiMAX. Запропоновано процедуру вимірювання дальності між призначеними кінцевими супутниками. Запропоновано процедуру передачі тестового сигналу вимірювання дальності між призначеними кінцевими супутниками. Запропоновано процедуру передачі тестового сигналу, що враховує особливості множинного доступу з ортогональним поділом несучих (OFDMA). Запропонована процедура може бути реалізована в варіанті мережі стандарту IEEE 802.16 для використання в «розподіленому супутнику».

**Ключові слова:** Низькоорбітальна супутникова система, LEO-система, розподілений супутник, Lega-Sat, взаємне положення кубсатів, двомірна матриця відстаней, багатомірна матриця кутів, мережа ширококутового радіо доступу WiMAX, адаптація стандартів IEEE 802.16.



**APPLICATION OF THE IEEE 802.16 BROADBAND ACCESS STANDARD FOR DETERMINATION OF THE RELATIVE POSITION OF CUBESATS IN LEGA-SAT**

*M. Ilchenko, T. Narytnyk, V. Prisyazhny,  
S. Kapshtyk, S. Matvienko*

It is considered the possibility of optimizing the use of the power capabilities of the cube-sat platform included in the "distributed satellite" to improve the performance of its payload. To optimize the use of energy capabilities, it was proposed to disconnect the onboard equipment of the command-and-telemetric radio link in the mode of regular operation of cube-sat in the "distributed satellite". To measure the current navigation parameters of cube-satellite in the conditions of group flight in the "distributed satellite" it is proposed to use the coordinates of the cube-satellite in the satellite coordinate system of the "distributed satellite" root satellite and the relative cube-relative velocity vector relative to the root satellite as the initial data. It is proposed to use a technique based on measurements of the distances between satellites in a "distributed satellite" and the projections of the vector of relative velocity for these distances to determine the coordinates of cube-sat in the satellite coordinate system. The features of the WiMAX broadband access protocol IEEE 802.16 protocols are examined to determine whether it is possible to perform mutual position measurements of satellites as part of a "distributed satellite" in one channel with information transmission. It pointed that the use of built-in means of measuring the range and access of mobile stations to the mobile WiMAX network makes it possible to perform measurements of the distance from the root satellite to the final satellite - cube-sat in the "distributed satellite". To perform the operations of measuring distances between the final satellites in the "distributed satellite", it is proposed to use the "competitive access zone" of the uplink sub-frame in the WiMAX network. A procedure for measuring the range between terminal satellites is proposed, based on measuring the propagation time of the distance measurement test signal between the assigned terminal satellites. It proposed a procedure for transmitting a test signal, taking into account the features of multiple access with orthogonal carrier separation (OFDMA). The proposed procedure can be implemented in a variant of the IEEE 802.16 standard network for application in a "distributed satellite".

**Keywords:** Low-Earth orbital satellite system, LEO-system, distributed satellite, Lega-Sat, mutual position of cubes, two-dimensional distance matrix, multidimensional matrix of angles, broadband radio access network WiMAX, adaptation of IEEE 802.16 standards.

**Ильченко Михаил Ефимович** – д-р техн. наук, проф., академик Национальной академии наук Украины, заслуженный деятель науки и техники, лауреат Государственных премий в области науки и техники Украинской ССР, СССР и Украины, проректор по научной работе НТУУ КПИ им. Игоря Сикорского, e-mail: ilch@kpi.ua.

**Нарытник Теодор Николаевич** – канд. техн. наук, академик Украинской академии наук, лауреат Государственных премий в области науки и техники Украинской ССР, СССР и Украины, директор СП «Институт электроники и связи Украинской академии наук»; вед. науч. сотр., проф. каф. телекоммуникаций Института телекоммуникационных систем НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского», e-mail: director@mitris.com.

**Присяжный Владимир Ильич** – канд. техн. наук, ст. науч. сотр., лауреат Государственной премии Украины в области науки и техники, начальник Национального Центра Управления и Испытаний Космических Средств, e-mail: ncuvkz@spacecenter.gov.ua.

**Капштык Сергей Владимирович** – канд. техн. наук, помощник начальника Национального Центра Управления и Испытаний Космических Средств, e-mail: sergii.kapshtyk@gmail.com.

**Матвиенко Сергей Анатольевич** – канд. техн. наук, ст. науч. сотр., Главный конструктор Научно-производственного комплекса «Курс», e-mail: matvienko\_2005@ukr.net.

**Ilchenko Mykhailo** – DrS on Engineering, professor, academician of National Academy of Sciences of Ukraine, Honored Scientist of Ukraine, Laureate of State Prize of the Ukrainian SSR, the USSR and Ukraine in science technology, vice-rector on scientific work of NTUU "KPI" named after Igor Sikorsky", e-mail: ilch@kpi.ua.

**Narytnyk Theodore** – PhD, Academician of the Ukrainian Academy of Sciences; Laureate of State Prizes in the field of science and technology of the Ukrainian SSR, USSR and Ukraine, Leading Research Associate, Professor of the Telecommunications Department of the Institute of Telecommunication Systems of Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute; director of the Joint venture "Institute of Electronics and Communications of the Ukrainian Academy of Sciences", e-mail: director@mitris.com.

**Prisyazhny Vladimir** – PhD, senior scientific researcher, Laureate of State Prizes in the field of science and technology of the Ukraine, Head of the National Space Facility Control and Testing Center, e-mail ncuvkz@spacecenter.gov.ua.

**Kapshtyk Sergii** – PhD, assistant to Head of the National Space Facility Control and Testing Center, e-mail sergii.kapshtyk@gmail.com.

**Matvienko Sergey** – PhD, senior scientific researcher, Chief Designer of the Research and Production Complex "Course", e-mail: matvienko\_2005@ukr.net.