

УДК 358.111.6

Алгоритм синтеза радионавигационной системы наблюдения космического базирования для однократного обзора поверхности Земли

С. П. Куликов

Центральный научно-дослідний інститут МО України, Київ

Надійшла до редакції 22.11.96

Пропонується алгоритм синтезу радіонавігаційної системи спостереження космічного базування, що характеризується простотою, наочністю, можливістю широкого застосування на практиці. Приводяться порівняльні оцінки результатів моделювання.

Радионавигационной системой наблюдения космического базирования (РНСН КБ) принято называть такую РНСН, в которой роль опорных радионавигационных точек (РНТ) выполняют искусственные спутники Земли, несущие навигационную аппаратуру. Навигационные ИСЗ (НИСЗ) являются аналогом неподвижных РНТ, представляющих собой измерительные пункты наземного базирования. Перенос РНТ из точек наземного и воздушного базирования в точки, совершающие орбитальное движение, привел к существенным изменениям в построении этих РНС.

Система НИСЗ представляет собой совокупность источников навигационных сигналов, передающих одновременно значительный объем служебной информации. На НИСЗ как на космических аппаратах размещается разнообразная аппаратура, средства пространственной стабилизации, аппарата траекторных измерений, телеметрическая система, аппаратура командного и программного управления, системы энергопитания и терморегулирования. С навигационными блоками взаимодействуют бортовой эталон времени и бортовая ЭВМ.

Аппаратура потребителей предназначена для приема сигналов от НИСЗ, измерения навигационных параметров и обработки измерений. Командно-

измерительный комплекс (КИК) служит для снабжения НИСЗ служебной информацией, необходимой для проведения навигационных сеансов, а также для контроля за НИСЗ и для управления ими как космическими аппаратами.

Многообразие вариантов РНСН КБ определяется различиями в распределении функций между звеньями РНСН КБ и в выборе технических принципов построения и функционирования этих звеньев и их элементов, особенностями структурных связей, а также спецификой организации навигационной работы. Таким образом, РНСН КБ могут различаться: местом решения навигационной задачи, степенью активности в смысле изучения потребителя, темпом выдачи определяемых параметров движения, высотой орбит НИСЗ, организацией измерений (канальность аппаратуры потребителя), параметричностью измерительного канала, характером эфемеридного обеспечения, размером рабочей области.

При проектировании РНСН КБ требуется оценивать ее качество по многим критериям. Поэтому рациональное решение этой задачи требует поэтапного подхода.

Обычно выделяют два этапа проектирования (уточнение структуры сети по критериям, вытека-

ющим из ее навигационного использования): кратности покрытия и точности местоопределения.

Совокупность важнейших навигационных требований к РНСН КБ можно свести к двум: сфера обслуживания должна совпадать с шаровым слоем, охватывающим поверхность земного шара, любой потребитель в сфере обслуживания должен иметь возможность мгновенно определить с погрешностями, не превосходящими заданные место, скорость и время.

Класс допустимых пространственных конфигураций сети НИСЗ, являющийся исходным для выбора по навигационным критериям, должен быть синтезирован на основе критериев и ограничений, вытекающих из технико-экономических и эксплуатационных аспектов создания и использования РНСН КБ.

В соответствии с этим в качестве исходного класса допустимых конфигураций сети НИСЗ принимается система на m круговых орбитах по k НИСЗ на каждой. Кроме того, считается, что орбиты имеют одинаковый наклон к плоскости земного экватора и равномерно разнесены по восходящим узлам. Последние свойства могут быть обоснованы по критерию относительной стабильности конфигурации сети в течение заданного интервала времени. Наконец, диапазон допустимых высот орбит должен содержать минимально возможную высоту.

Существуют различные методы синтеза РНСН КБ. Например, в работе Можаяева (1989) рассматривается теоретико-групповой подход, предлагаются также геометрический подход, метод простого перебора по высоте и др. Однако эти методы либо очень сложны для понимания (теоретико-групповой подход), либо имеют большое количество решений (метод простого перебора), особенно с возрастанием n — общим количеством НИСЗ.

Например, для РНСН КБ полярного типа для однократного обзора поверхности Земли были получены данные, приведенные в табл. 1. Метод, изложенный в работе Можаяева (1989) является

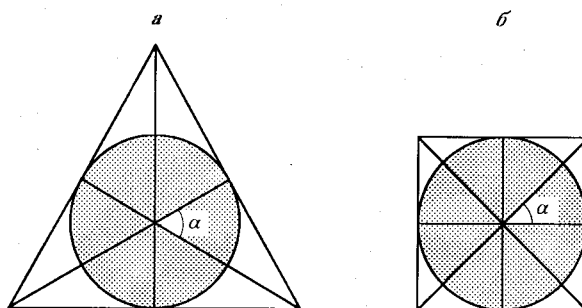


Рис. 1. Сечение в плоскости орбиты: а — для трех НИСЗ, б — для четырех НИСЗ

точным, но достаточно сложным, что затрудняет использование его на практике. Поэтому автором предлагается подход, который дает приближенную оценку границ решения, показанного в табл. 1.

Пусть для минимального количества НИСЗ с минимальной высотой полета зоны обзора не пересекаются, а только соприкасаются. В таком случае сечения в плоскости орбиты для различного количества НИСЗ на одной орбите будут иметь вид, представленный на рис. 1.

Для k НИСЗ на одной орбите получим следующую формулу:

$$\alpha = \pi/k,$$

Если обозначить радиус Земли — R_3 , будем иметь

$$R_3/(R_3 + h_k) = \cos(\pi/k),$$

где h_k — высота полета НИСЗ над поверхностью Земли. Следовательно,

$$h_k = R_3 [1/\cos(\pi/k) - 1].$$

Полная площадь поверхности Земли равна

$$S_{зем} = 4\pi R_3^2 = 5.112115 \cdot 10^{14} \text{ м}^2 \approx 5 \cdot 10^8 \text{ км}^2,$$

где $R_3 = 6\,378\,160$ м.

Площадь поверхности обзора для одного НИСЗ находится по формуле

$$S_k = \pi R_3^2 [1 - \cos(\pi/k)].$$

Очевидно, при однократном охвате всей поверхности Земли часть поверхности обзора для каждого НИСЗ будет накладываться на такие же поверхности обзора других НИСЗ. Допустим, что эффективность обзора РНСН КБ для каждого НИСЗ составляет 50%. Для обоснования этого утверждения воспользуемся проектом «Тайменш» фирмы TRW (Дмитриев и др., 1982).

Таблица 1. Точное решение для РНСН КБ полярного типа

| n | m | k | h |
|-----|-----|-----|------|
| 6 | 2 | 3 | 9.75 |
| 8 | 2 | 4 | 5.29 |
| 10 | 2 | 5 | 4.31 |
| 12 | 3 | 4 | 3.33 |
| 15 | 3 | 5 | 2.21 |
| 18 | 3 | 6 | 1.92 |
| 21 | 3 | 7 | 1.55 |
| 24 | 4 | 6 | 1.36 |

Проект «Тайменш» предназначался для ВМФ США и предусматривал создать 4 кратное покрытие с помощью системы из 21—27 НИСЗ, равномерно размещенных по 7—9 НИСЗ в трех орбитальных плоскостях, сдвинутых по долготе на 120° . Высота орбит $(14...18) \cdot 10^3$ км, наклонение 55° , период обращения 8 ч. Дальномерные сигналы НИСЗ, излучаемые на двух когерентно связанных несущих частотах, содержат код принадлежности данному НИСЗ, синхросигнал данной орбиты и служебную информацию. В любой момент времени из любого места Земли обеспечивается одновременная видимость не менее четырех НИСЗ. Это позволяло бы потребителю в пассивном режиме практически мгновенно определять пространственные координаты и поправку к бортовой шкале времени. Кроме того, доплеровские измерения позволяли бы определять составляющие вектора скорости потребителя. Проект «Тайменш» явился основой проекта NAVSTAR (Мищенко, 1980).

В проекте «Тайменш» для описания области радиовидимости НИСЗ используется ортодромическая система координат. За большой круг ортодромии следует выбрать проекцию орбиты на неподвижную сферу радиуса, равного радиусу земного шара. Если принять за начало отсчета подспутниковую точку, то положение потребителя будет определяться смещением λ вдоль ортодромии, боковым отклонением γ и высотой H над неподвижной сферой.

Во введенной системе координат условие радиовидимости НИСЗ запишется как

$$\cos \lambda \cos \gamma \geq \cos \theta,$$

где θ — сферический угол зоны радиовидимости, который определяется конструктивными, геометрическими, либо функциональными ограничениями, а именно: шириной диаграммы направленности антенны НИСЗ, ограничением радиовидимости вследствие затенения Землей, минимально допустимым возвышением h_{\min} НИСЗ над горизонтом определяемого объекта.

Оценки кратности покрытия зонами радиовидимости НИСЗ используют понятие полосы покрытия и области перекрытия различной кратности. Рассмотрим подробнее структуру навигационного поля, создаваемого цепочкой НИСЗ, размещенных на одной орбите.

Использование понятий полосы покрытия и области перекрытия цепочки позволяет сформулировать и решить задачу о достаточных условиях оптимальности сети НИСЗ при условии обеспечения минимальной кратности покрытия, равной заданной. Критерием оптимальности здесь служит

минимум числа НИСЗ в сети. Обеспечение минимального числа НИСЗ в цепочке приводит к необходимости увеличения ширины ее полосы. Однако на сфере обслуживания, очевидно, неизбежно при большой высоте НИСЗ остаются непокрытыми этой полосой два сферических сегмента. Высота второй полосы позволяет при подходящей ее ширине обеспечить их покрытие. Но при этом обязательно образуются области, перекрываемые полосами дважды. Если плоскости цепочек ортогональны, то площадь этих областей будет минимальна. Так, для двух цепочек перекрытия площадь цепочки равна

$$S_{\text{ц}} = S_{\text{сф}} - 2S_{\text{ср}},$$

где $S_{\text{сф}}$ — площадь сферы, $S_{\text{ср}}$ — площадь непокрытого сегмента.

Отсюда

$$S_{\text{ц}} = 4\pi R_3^2 - 2(2 - 2/\sqrt{2})\pi R_3^2 = 2\sqrt{2}\pi R_3^2.$$

Область взаимного перекрытия цепочки равна

$$S_{\text{пр}} = S_{\text{сф}} - 4S_{\text{ср}} = 4(\sqrt{2} - 1)\pi R_3^2,$$

что составляет $(\sqrt{2} - 1)100\% \approx 41\%$. Если учесть зоны перекрытия в самих цепочках, то зона взаимного перекрытия будет значительно больше. Таким образом, общая зона перекрытия составит 91% , что соответствует эффективности каждого НИСЗ 45.5% .

Добавление третьей цепочки приведет к образованию еще двух пар областей, перекрываемых двумя полосами. Ортогональность плоскости третьей цепочки плоскостями первых двух минимизирует и их площади. Тогда, за исключением некоторых сферических областей в окрестностях узлов сети, покрываемых, как было указано, двумя полосами, остальная поверхность сферы будет покрываться всеми тремя полосами. Одновременно области перекрытий двух полос будут иметь наименьшую возможную площадь, в то время как площадь, покрываемая всеми тремя полосами, будет максимальна.

Прежде всего следует подчеркнуть, что соображения в пользу построения сети на трех ортогональных орбитах справедливы лишь при требовании использования полос минимальной ширины. Если же допустить использование более широких полос, то число НИСЗ может быть уменьшено за счет сокращения числа цепочек.

Необходимо также учесть, что при построении цепочек в узлах перекрытия образуются зоны, которые не покрываются областями видимости ни одного из НИСЗ. Это и выше приведенные рассуждения позволяют сделать предположение, что мак-

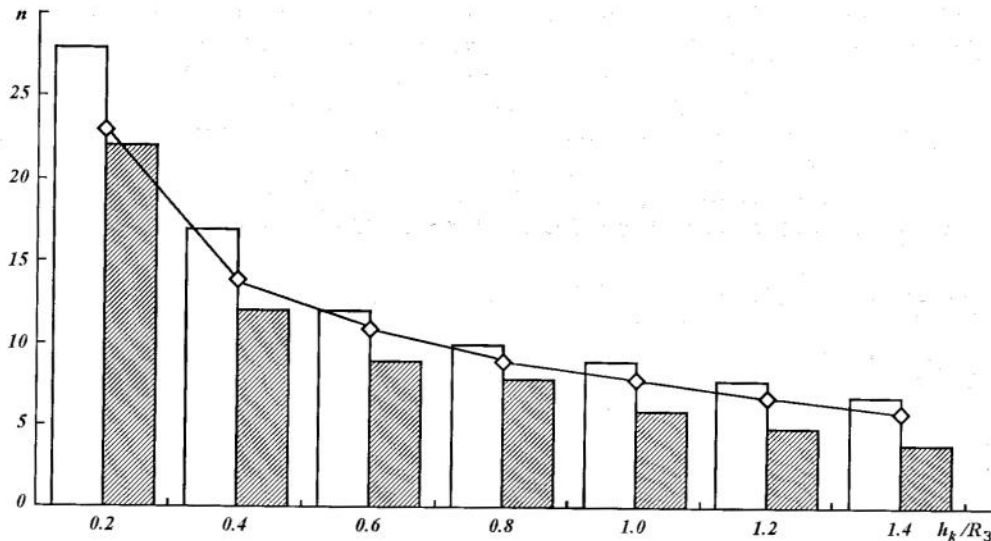


Рис. 2. Результаты оценок точного и приближенного решений

симальной эффективностью обзора НИСЗ будет система из двух ортогональных орбит. Ее эффективность будет достигать около 50 %, в остальных случаях эта эффективность будет значительно хуже.

Таким образом, для обеспечения однократного покрытия зонами видимости всей поверхности Земли необходимо $2S_3/S_k$ НИСЗ. Очевидно, что эта величина будет находиться между n_1 и n_2 которые являются кратными числу орбит. В табл. 2 приводятся значения расчета верхних и нижних пределов количества НИСЗ по приближенному алгоритму. Оценки, полученные по приближенному алгоритму, дают верхнюю и нижнюю границу РНСН КБ полярного типа (табл. 1). Зависимость количества НИСЗ РНСН КБ полярного типа и результатов оценок приближенного алгоритма от

величины h_k/R_3 представлены на рис. 2.

К недостаткам приближенного алгоритма построения орбитальных систем для однократного обзора поверхности Земли следует отнести невысокую точность полученных решений. Она может быть повышена за счет статистической обработки верхней и нижней границ (например, усреднения). К достоинствам алгоритма следует отнести его простоту, наглядность, возможность широкого применения в практических задачах.

Дмитриев П. П., Шебшаевич В. С. (ред.) Сетевые спутниковые радионавигационные системы. — М.: Радио и связь, 1982.— 272 с.

Мищенко И. Н., Волькин А. И., Волосов П. С. и др. Глобальная навигационная система NAVSTAR // Зарубеж. радиоэлектроника.—1980.—№ 8.—С. 52—83.

Можаяев Г. В. Синтез орбитальных структур спутниковых систем. — М.: Машиностроение, 1989.—304 с.

Таблица 2. Приближенное решение для РНСН КБ полярного типа

| k | $h_k, 10^6$ м | $S_k, 10^6$ км ² | $2S_3/S_k$ | $n_1 - n_2$ | m |
|-----|---------------|-----------------------------|------------|-------------|-----|
| 3 | 6.378160 | 127.802883 | 8 | 6—9 | 2—3 |
| 4 | 2.641919 | 74.865137 | 13.65 | 12—16 | 3—4 |
| 5 | 1.505679 | 48.816354 | 20.94 | 20—25 | 4—5 |
| 6 | 0.986708 | 34.244526 | 29.86 | 24—30 | 4—5 |
| 7 | 0.701062 | 25.312894 | 40.39 | 35—42 | 5—6 |
| 8 | 0.525514 | 19.456710 | 52.54 | 48—56 | 6—7 |
| 9 | 0.409333 | 15.414816 | 66.32 | 63—72 | 7—8 |

ALGORITHM FOR THE SYNTHESIS OF A SPACE-BASED RADIO-NAVIGATIONAL OBSERVATION SYSTEM FOR A SINGLE SURVEY OF THE EARTH SURFACE

S. P. Kulikov

We propose an algorithm for the synthesis of a space-based radio-navigational observation system. The algorithm is simple and clear in its structure and can be widely used for practical purposes. Comparison with other radio-navigational observation systems is made.