

К 100-ЛЕТИЮ Б.В. СЕСТРОРЕЦКОГО

УДК 629.783

УМЕНЬШЕНИЕ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ПЕРЕДАЮЩЕЙ АКТИВНОЙ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ НИЗКООРБИТАЛЬНОГО СПУТНИКА СВЯЗИ С “ПРЫГАЮЩИМ” ЛУЧОМ

© 2023 г. В. Р. Анпилогов^a, В. В. Денисенко^{b, c}, Б. А. Левитан^{b, c, d}, В. Н. Козлов^{b, d},
А. М. Шитиков^{b, d}, А. В. Шишлов^{b, *}

^a АО “ВИСАТ-ТЕЛ”, 2-я Звенигородская ул., 13, стр. 37, Москва, 123022 Российская Федерация

^b ПАО “Радиофизика”, ул. Героев Панфиловцев, 10, Москва, 123363 Российская Федерация

^c Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Волоколамское шос., 4, Москва, 125993 Российская Федерация

^d Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Институтский пер., 9, Долгопрудный Московской обл., 141701 Российская Федерация

*E-mail: shishlov54@mail.ru

Поступила в редакцию 19.02.2023 г.

После доработки 17.05.2023 г.

Принята к публикации 20.05.2023 г.

Представлены результаты анализа энергопотребления передающей активной фазированной антенной решетки (АФАР) космического аппарата (КА) низкоорбитальной системы связи (широкополосного доступа или прямого доступа к абонентам сотовой сети). Показано, что для уменьшения энергопотребления включением (выключением) излучателей в зависимости от угла отклонения луча от надира можно достичь существенного снижения тепловыделения АФАР КА. Но это решение реализуемо только при условии, что АФАР формирует один “прыгающий” луч.

DOI: 10.31857/S0033849423080016, EDN: UWVIEW

ВВЕДЕНИЕ

Известно много проектов, посвященных созданию систем широкополосного доступа (ШПД) на основе низкоорбитальных спутников [1] в Ku- и Ka-диапазонах. Одним из наиболее продвинутых проектов по состоянию на 2023 год является Starlink, поскольку система уже перешла в стадию начала коммерческой эксплуатации. Но все низкоорбитальные спутниковые проекты ШПД с начала их зарождения имеют высокую себестоимость активной фазированной антенной решетки (АФАР) абонентского терминала (АТ). Цена АТ неприемлема для массового рынка [2–7].

Также АТ имеет высокое энергопотребление АФАР (примерно до 180 Вт), что создает эксплуатационные проблемы (высокое тепловыделение, перегрев и отключение АФАР). Решение задачи уменьшения энергопотребления АФАР АТ за счет включения (выключения) части ее излучателей рассмотрено в [8]. Но аналогичная задача уменьшения энергопотребления и тепловыделения актуальна и для АФАР космического аппарата (КА) системы спутниковой связи (например, [9, 10]). АФАР низкоорбитального КА создает приемопередающий луч, который обслуживает заданную

локальную зону на Земле (далее — “ячейка”) в интервале времени Δt_k . При этом луч может быстро (за время менее единиц миллисекунд) переключаться между “ячейками”. Тем самым, луч в процессе движения низкоорбитального КА не “скользит” по поверхности Земли, а последовательно обслуживает заданные “ячейки”, задерживаясь в направлении каждой из них на время Δt_k . По мере того, как КА уходит из зоны видимости “ячейки”, начинает работать смежный КА, луч которого обеспечивает непрерывность ее обслуживания.

Аналогичная идеология обслуживания “ячеек” рассматривается в материалах 3GPP при использовании спутниковой компоненты 5G NTN [11] и в ряде проектов, не связанных с 3GPP [12]. Это уже системы не ШПД, а бесшовной персональной спутниковой связи (ПСС), в которых обеспечивается прямое обслуживание типовых АТ (например, смартфонов) сотовых сетей 4G/5G и GSM в выделенных им диапазонах частот (S-диапазон и ниже). Такие спутниковые системы обозначали как “Direct-to-Cell”, но в нормативном документе FCC от февраля 2023 г. их уже обозначают “Direct-to-Device” (прямая связь с устройством сотовой сети) или сокращенно D2D. В этом случае не надо создавать абонентский сегмент спутниковой

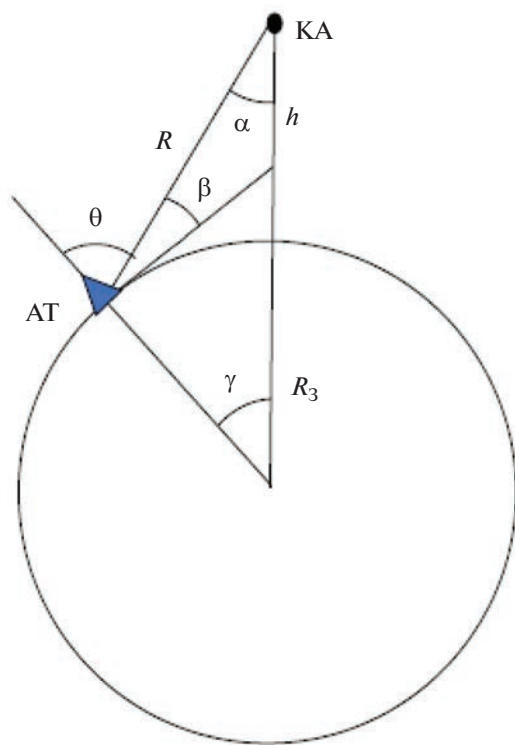


Рис. 1. Взаимное расположение КА и АТ.

системы. Он уже существует, но требуется адаптация программного обеспечения (ПО) в ядре сотовой сети.

Эти системы только начинают проектироваться, но уже известны и положительные экспериментальные результаты, опубликованные компаниями Lync (<https://ftimes.ru/321253-lynk-global-pervoj-podklyuchila-sputnik-napryamuyu-k-obychnym-mobilnym-telefonam-na-zemle.html>) и AST (https://www.reddit.com/r/ASTSpaceMobile/comments/q6tqw8/ast_spacemobile_the_starlink_of_smartphones) подтверждающие реализуемость бесшовной низкоорбитальной спутниковой сети, в которой применена технология “Direct to-Device” (<https://spacenews.com/direct-to-cell-startups-welcome-musks-arrival>).

Одним из ключевых элементов КА в системах ШПД и бесшовной ПСС является АФАР с быстро переключаемым в пространстве лучом. Алгоритм переключения луча — это результат решения многокритериальной задачи. Исходными параметрами для ее решения являются информационная скорость, требуемая для обслуживания АТ в “ячейке”, объем информации, доступный для АТ, число АТ в каждой “ячейке” и общее количество обслуживаемых “ячеек”. Но независимо от алгоритма переключения луча между “ячейками” проблемой является минимизация энергопотребления АФАР КА и, соответственно, ее тепловыделение.

Авторы предлагают решить указанную проблему путем включения/выключения излучателей передающей АФАР КА, что и рассмотрено далее.

1. ДВИЖЕНИЕ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ СПУТНИКОВ СВЯЗИ

При движении КА по круговой орбите вокруг Земли изменяются его положение относительно АТ в “ячейке” и наклонная дальность R от КА до АТ. Луч АФАР относительно узкий, и эквивалентный диаметр создаваемой им “ячейки” примерно соответствует диаметру зоны (менее 100 км) обслуживания базовой станции в сотовой сети. Соответственно, значение R можно отнести к АТ в центре “ячейки”. Наибольшие изменения углового положения АТ относительно КА и расстояния до него соответствуют условию, когда АТ находится в плоскости орбиты КА (рис. 1).

В этом случае угловое положение АТ относительно КА можно задать одним углом — например, углом α видимости АТ из точки орбитального положения КА.

Наклонная дальность $R(\alpha)$ определяется взаимным положением КА и АТ, которая следует из соотношения [8]

$$R(\alpha) = R_3 \frac{\sin \gamma}{\sin \alpha}, \quad (1)$$

где

$$\sin \gamma = \cos(\alpha + \beta)$$

($\beta = \arccos(\sin(\alpha)(R_3 + h)/R_3)$ — текущий угол места видимости КА из точки расположения АТ, α — текущий угол видимости АТ из точки расположения КА на орбите); γ — текущий геоцентрический угол для КА при его движении по орбите; h — высота орбиты КА над Землей; $R_3 = 6371$ км — радиус Земли.

В табл. 1 приведено взаимное соответствие углов α , β , γ и время сеанса связи T в зависимости от высоты h орбиты КА.

Спутник совершает оборот вокруг Земли за время T_0 , а сеанс связи с АТ составляет максимум T [8]:

$$T \approx T_0(2\gamma_{\max}/360^\circ), \quad (2)$$

где $T_0 = 84.4((R_3 + h)/R_3)^{3/2}$ мин, $\gamma_{\max}$ — максимальный геоцентрический угол, определяемый из (1) для минимального $\beta_{\min}$, соответствующего максимальному $\alpha_{\max}$.

Максимальные угловые секторы сканирования луча АФАР АТ и АФАР КА составляют $\pm(90^\circ - \beta_{\min})$ и $\pm\alpha_{\max}$ соответственно. Здесь $\beta_{\min}$ — минимальный угол места, с которого начинается сеанс работы КА с АТ, $\alpha_{\max}$ — максимальный угол отклонения луча АФАР КА от надира в пределах сеанса связи T .

Таблица 1. Угловые параметры КА и АТ в центре “ячейки”, время сеанса связи и наклонная дальность между ними

Параметры	Значения параметров для разных высот орбиты КА, h , км								
	500			1000			1500		
β , град	30	45	60	30	45	60	30	45	60
α , град	53.4	41.1	27.6	48.5	37.8	25.6	44.5	35.0	23.9
γ , град	6.6	3.9	2.4	11.5	7.2	4.4	15.5	10.0	6.1
T , мин	3.4	2.1	1.2	6.7	4.3	2.6	10.0	6.5	4.0
R , км	910	683	571	1702	1329	1130	2561	1949	1680

Углы $\alpha_{\max}$, $\beta_{\min}$, $\gamma_{\max}$ однозначно связаны между собой формулой $90^\circ = \alpha_{\max} + \beta_{\min} + \gamma_{\max}$.

Плотность потока мощности (ППМ) в полосе частот информационного канала, который создает передающий луч АФАР КА в обслуживаемой “ячейке” на Земле, зависит от его эквивалентной изотропной излучаемой мощности (ЭИИМ) и квадрата расстояния $R(\alpha) \equiv R(\beta)$. Максимум ЭИИМ достигается при $\alpha = 0^\circ$ и $\beta = 90^\circ$, т.е. при направлении луча АФАР КА в надир. Но максимальный уровень спектральной ППМ на поверхности Земли всегда нормативно ограничен (например, [13]). С целью максимизации информационной скорости канала связи в направлении любой “ячейки” в зоне обслуживания КА целесообразно обеспечить максимальный нормативно допустимый уровень ППМ для любого угла α .

При движении луча АФАР КА от максимального угла отклонения $\alpha_{\max}$ к надиру ($\beta = 90^\circ$, $\alpha = 0^\circ$) энергетика радиолинии и ППМ увеличиваются за счет уменьшения наклонной дальности и увеличения коэффициента усиления антенны КА в надире (принято, как $1/\cos\alpha$). Если ЭИИМ антенны КА неизменна, то ППМ, которая создается в “ячейке” для любого информационного канала луча, существенно изменяется за время сеанса связи T , например, увеличивается при его движении к надиру (изменение ППМ $\Delta_{\text{ППМ}}$ для разных высот орбит КА показано на рис. 2). Соответственно, необходимо выключать часть излучателей передающей АФАР КА в процессе приближения луча к надиру.

Очевидно, что во всем интервале времени сеанса связи нет необходимости поддерживать максимальное значение ЭИИМ луча АФАР КА. В области углов надир $\alpha = 0^\circ$ луч должен иметь минимально необходимое значение ЭИИМ, а при максимальном угле α_m ориентации луча значение ЭИИМ должно достигать своего максимума. Но в итоге должно быть обеспечено условие примерного (с уровнем снижения от максимума не более чем на 3 дБ) постоянства ППМ в любой “ячейке”

на Земле во всем интервале углов сканирования $\pm\alpha_m$ луча АФАР КА.

Интервал времени T зависит от орбитального построения спутниковой группировки и географического положения обслуживаемой “ячейки”. Соответственно, алгоритм включения и выключения излучателей АФАР КА в общем случае будет взаимосвязан с текущим временем t наблюдения КА. При этом по мере приближения луча к $\alpha_{\max}$ скорость изменения (дБ/с) энергетики радиолинии возрастает.

2. ВЫКЛЮЧЕНИЕ (ВКЛЮЧЕНИЕ) ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ПЕРЕДАЮЩЕЙ АФАР КА

Предположим, что АФАР КА формирует один передающий луч. В рабочей полосе частот луча сформирован один или несколько информационных частотных каналов. Уровень ППМ электромагнитного поля $P_{\text{КА}}(\alpha)$, создаваемого лучом АФАР КА на поверхности Земли в полосе частот информационного канала, определяется соотношением

$$P_{\text{КА}}(\alpha) = \frac{P_{\text{КА}} G_{\text{КА}}(\alpha)}{4\pi R(\alpha)^2}, \quad (3)$$

где $P_{\text{КА}}$ — мощность, излучаемая АФАР КА (в полосе частот передающего канала), $G_{\text{КА}}(\alpha)$ — коэффициент усиления АФАР КА в направлении центра обслуживаемой ячейки, $R(\alpha)$ — текущее расстояние от КА до центра “ячейки” (наклонная дальность).

Полагая, что ППМ на поверхности Земли не превышает допустимого значения [13] и для каждого текущего направления α включается необходимое число $N(\alpha)$ излучателей передающей АФАР КА, перепишем (3) в виде

$$P_{\text{КА}}(\alpha) = \frac{p g(\alpha) N^2(\alpha)}{4\pi R^2(\alpha)}, \quad (4)$$

где p — мощность одного канала (излучателя) АФАР КА (предполагается, что все каналы оди-

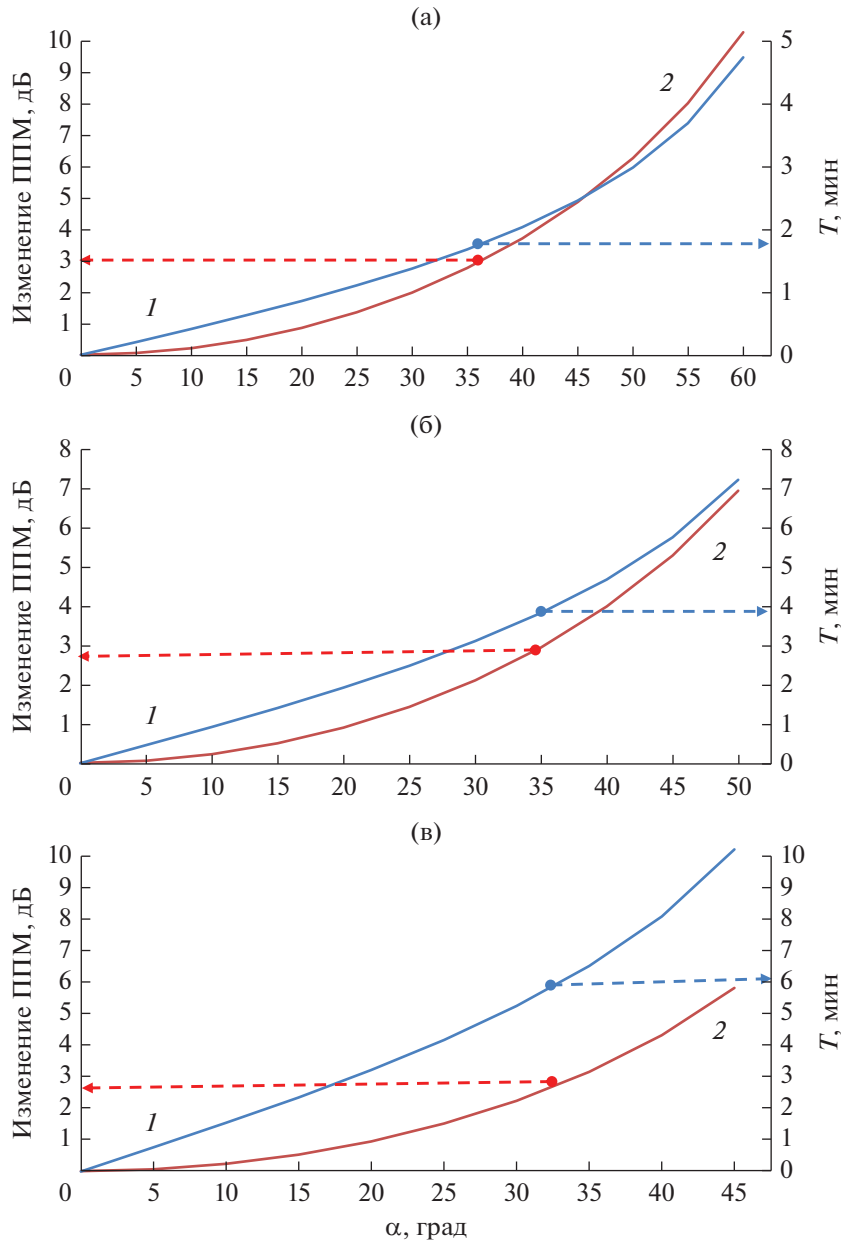


Рис. 2. Изменение энергетики радиосвязи и длительности сеанса связи для высоты орбиты $h = 500$ (а), 1000 (б) и 1500 км (в): 1 – длительность сеанса связи T , 2 – изменение ППМ $\Delta_{\text{ППМ}}$.

наковые), $g(\alpha)$ – усиление излучателя АФАР КА в направлении центра “ячейки”.

Потребуем, чтобы ППМ на поверхности Земли была постоянна и равна Π_0 , тогда из (4) получим соотношение для количества включенных излучателей передающей АФАР КА:

$$N(\alpha) = R(\alpha) \left(\frac{4\pi\Pi_0}{pg(\alpha)} \right)^{1/2}. \quad (5)$$

Предположим, что максимум ДН излучателя АФАР КА совпадает с нормалью к ее апертуре и направлен в надир. Коэффициент усиления излу-

чателя по нормали к апертуре равен g_0 . Количество включенных излучателей АФАР КА при направлении луча в надир составляет

$$N_0 = h \left(\frac{4\pi\Pi_0}{pg_0} \right)^{1/2}. \quad (6)$$

Из (5) и (6) получим отношение числа включенных излучателей передающей АФАР КА для произвольного угла α направления луча и его положения в надире:

$$\frac{N(\alpha)}{N_0} = \frac{R(\alpha)}{h} \left(\frac{g_0}{g(\alpha)} \right)^{1/2} = \xi. \quad (7)$$

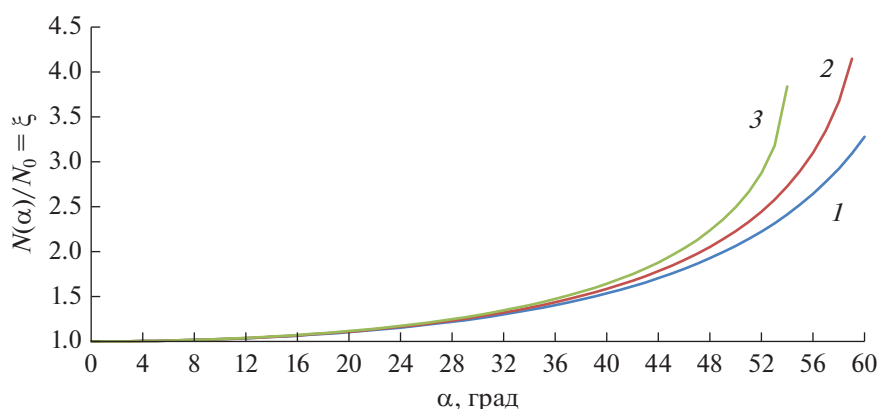


Рис. 3. Относительное увеличение числа включенных излучателей АФАР КА по мере отклонения луча от надира для $h = 500$ (1), 1000 (2) и 1500 км (3).

Примем, что диаграмма направленности отдельного излучателя АФАР аппроксимируется функцией $g(\alpha) = \cos^v \alpha$. При $v = 1$ соотношение (7) выглядит следующим образом с учетом текущего времени сеанса связи:

$$\xi(\alpha(t)) = \frac{N(\alpha(t))}{N_0} = \frac{R(\alpha(t))}{h} (\cos(\alpha(t)))^{-1/2}, \quad (8)$$

где $R(\alpha(t))$ — определяется формулой (1).

На рис. 3 приведены графики для оценки отношения $N(\alpha)/N_0$ в зависимости от угла α луча АФАР КА в соответствии с (8). Напомним, что площадь “ячейки” маленькая и для всех ее АТ можно принять примерно один и тот же угол α .

Из (8) и рис. 2 следует, что при отклонении луча от надира в секторе углов $-30^\circ \leq \alpha < +30^\circ$, число включенных излучателей изменяется менее, чем на 30% независимо от высоты орбиты КА, а при $-60^\circ \leq \alpha < +60^\circ$ — более чем на 300% и уже значительно зависит от высоты орбиты.

3. ДИСКРЕТИЗАЦИЯ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ АФАР КА И ЕЕ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕ

В реальных АФАР излучатели включаются (выключаются) группами, поскольку каждую такую группу обслуживает отдельный источник питания. Предположим, что в группу входит m излучателей. При наличии M таких групп, получаем общее (максимальное) количество N излучателей в АФАР, необходимое для создания требуемой ППМ на поверхности Земли на краю сектора электронного сканирования $\alpha_{\text{макс}}$:

$$N = N(\alpha_{\text{мин}}) = Mm = (M_0 + M(\alpha_{\text{макс}}))m, \quad (9)$$

где M_0 — число групп излучателей, находящихся включенными постоянно, $M(\alpha_{\text{макс}})$ — число групп излучателей, которые могут включаться по мере удаления луча от надира (или отключаться при приближении к надиру).

Критерием включения/выключения групп излучателей $M(\alpha_{\text{макс}})$ является изменение ППМ в ячейке, которое соответствует изменению ЭИИМ более $\text{tr}_0 g(\alpha)$.

Общее число групп излучателей АФАР составляет $N(\alpha_{\text{макс}})/m = M$, где $M = \{1; 2; \dots; N(\alpha_{\text{макс}})\}$ множество натуральных чисел. Число излучателей в каждой группе $m = \{1; 2; \dots; N(\alpha_m)/M\}$, в общем случае — произвольное натуральное число.

Выбор конкретного значения m , как отмечено выше, зависит от схемы электропитания излучателей АФАР, в которой один источник питания обеспечивает работу m излучателей (максимально $m = N(\alpha_{\text{макс}})/2$). Соответственно, число включенных излучателей $N(\alpha)$ в АФАР изменяется дискретно в зависимости от отклонения луча α от надира.

Таким образом, дискретная функция $N_d(\alpha)$ зависит от необходимого количества групп излучателей передающей АФАР КА при отклонении луча на угол α для обеспечения примерного постоянства ППМ в зависимости от текущего времени движения спутника в зоне видимости АТ, расположенных в “ячейке”:

$$N_d(\alpha(t)) = m \text{int} \left(\frac{N(\alpha(t))}{m} \right), \quad (10)$$

где $\text{int}(x)$ — целая часть числа x .

Соотношение (10) показывает, что для каждого положения луча, направленного под углом α от надира в пределах $\pm \alpha_{\text{макс}}$, должно быть включено дискретное значение групп каналов (излучателей) $N_d(\alpha)$, что определяется моментом времени t в пределах сеанса связи T ($0 < t \leq T$). Интервал времени T определяется (2) и приведен в табл. 1 для примера.

Мощность потребления АФАР при положении луча в надири при известном общем числе излучателей АФАР $N(\alpha_{\text{макс}})$, обеспечивающая до-

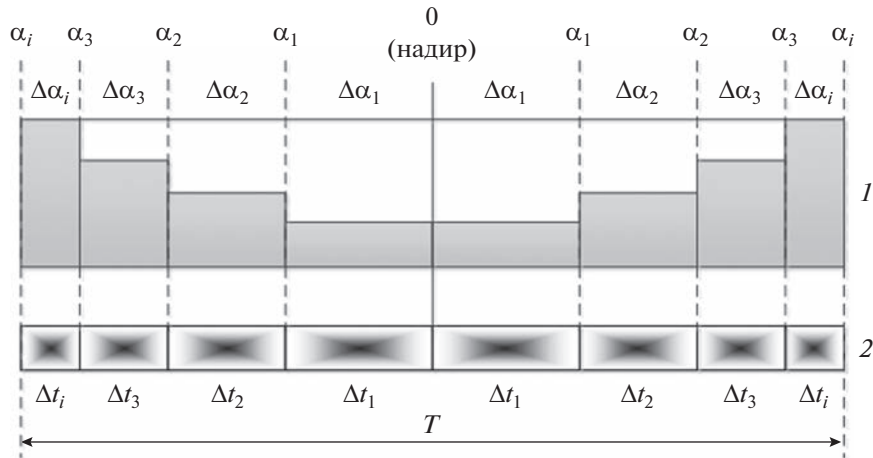


Рис. 4. Иллюстрация включения групп излучателей АФАР: 1 – ЭИИМ, 2 – ППМ.

стижение максимально допустимого ППМ для заданного максимального угла отклонения луча $\alpha_{\text{макс}}$, составляет

$$P_0 = N(\alpha_{\text{макс}})w/\xi_{\text{мин}}, \quad (11)$$

где $\xi_m = N(\alpha_{\text{макс}})/N_0 = R(\alpha_{\text{макс}})/h(\cos(\alpha_m))^{-1/2}$, w – энергопотребление одного излучателя.

Число излучателей $N(\alpha_{\text{макс}})$ рассчитывается исходя из энергетики радиолинии и достижения предельного ППМ, но принимается с учетом (10).

В процессе нахождения (движения) луча АФАР КА в области надира в пределах углов отклонения $\pm(0 + \alpha_1) = \pm\Delta\alpha_1$ АФАР имеет минимум энергопотребления $Q_{\text{мин}}$, которое сохраняется в интервале времени $2\Delta t_1$. При дальнейшем увеличении отклонения луча более α_1 уровень ЭИИМ АФАР снижается, что компенсируется включением дополнительной группы излучателей $mpg(\alpha_1)$. Этот уровень ЭИИМ сохраняется в пределах угловых отклонений луча $\alpha_2 - \alpha_1 = \Delta\alpha_2$ и временно-го интервала Δt_2 для любого его азимутального направления. При движении луча за пределы угла α_2 его ЭИИМ снижается уже настолько, что включается еще одна дополнительная группа $mpg(\alpha)$. Этот процесс продолжается до тех пор, пока не будут включены все M групп, работа которых продолжается в интервале времени Δt_M . При этом энергопотребление АФАР КА достигает своего максимума $Q_{\text{макс}}$ и сохраняется до угла $\alpha_{\text{макс}}$. В итоге $\Sigma\Delta\alpha_i = \alpha_{\text{макс}}$ и $2\Sigma\Delta t_i = T$, где максимальное значение $i = M$. На рис. 4 иллюстрируется этот процесс при $M = 4$.

Интервал времени $2\Delta t_1$, в пределах которого всегда работают mM_0 излучателей, определяется скоростью v (дБ/с) изменения ППМ в “ячейке”. Переключение наступает при $\Delta t_1 v = mg(\alpha) = \Delta A$, где $\alpha \in [0; \Delta\alpha)$. Для интервала времени $2\Delta t_1$ на-

хождения луча в области надира $\alpha \in [0; \Delta\alpha)$ значение $\Delta A \approx 3$ дБ.

На рис. 4 приведены значения интервала углового отклонения луча $\Delta\alpha_1$ и интервала времени Δt_1 , соответствующие снижению ППМ на 3 дБ. Из этих данных следует, что луч в области надира находится примерно от 45 до 65% времени сеанса связи T .

Следует учитывать, что в процессе обслуживания “ячеек” луч может как удаляться от надира до угла $\alpha_{\text{макс}}$, так и приближаться затем к надиру, задерживаясь в каждой k -й “ячейке” на время Δt_k . Причем число k в общем случае неизвестно и может быть произвольным. В пределах каждого интервала времени Δt_i (см. рис. 4) может обслуживаться множество “ячеек” при условии $\Delta t_i \gg \Delta t_k$. В итоге известными ограничениями являются условия

$$2\sum_{i=1}^M \Delta t_i = \sum_{k=1}^M \Delta t_k = T - \sigma, \quad (12)$$

где $\sigma \ll T$ суммарное время, затраченное на переход от одной “ячейки” к другой, и $k \gg M$.

Минимальная энергия, потребляемой АФАР, условно может быть принята равной

$$Q_{\text{мин}} = P_0 T. \quad (13)$$

Максимальная энергия, потребляемая АФАР –

$$Q_{\text{макс}} = P_0 T \xi. \quad (14)$$

Очевидно, что реальное энергопотребление Q за время сеанса связи T будет находиться в пределах $Q_{\text{мин}} < Q \leq Q_{\text{макс}}$. Отметим, что предельное снижение энергопотребления АФАР составляет не более

$$Q_{\text{макс}}/Q_{\text{мин}} < \xi. \quad (15)$$

В общем виде энергию, потребляемую АФАР КА за время сеанса связи, можно записать следующим образом

$$Q = P_0 T + F_d(t, \alpha) w, \quad (16)$$

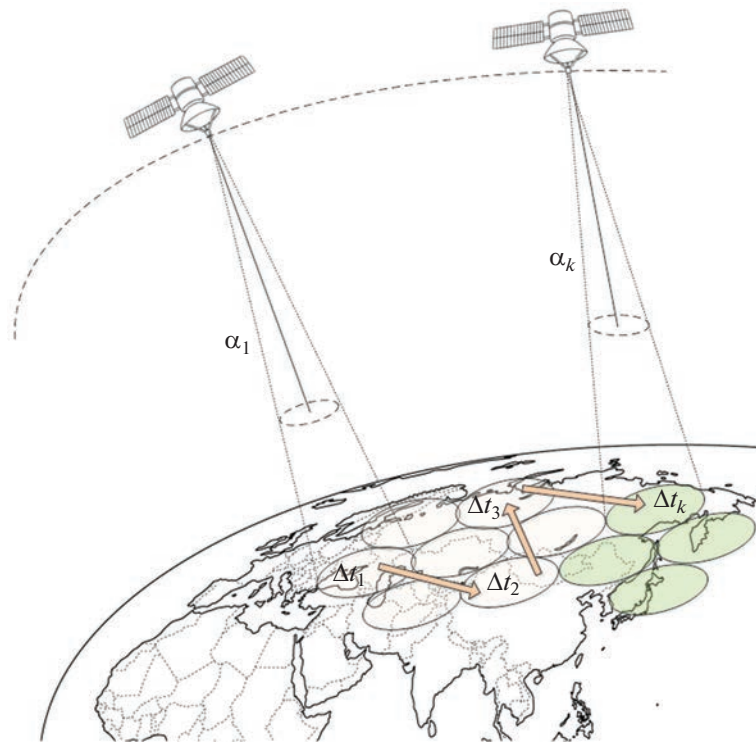


Рис. 5. Иллюстрация обслуживания прыгающим лучом АФАР КА множества “ячеек” на поверхности Земли.

где P_0 – минимальная мощность электропотребления АФАР при направлении луча в надир (минимальное количество включенных излучателей), $F_d(t, \alpha)$ – дискретная функция, зависящая от времени t ($0 < t \leq T$), представляющая собой взвешенную (по количеству групп включенных излучателей M с учетом количества излучателей m к группе) сумму интервалов времени Δt_k для угла $\alpha_k(t)$ отклонения луча от надира.

В общем случае функция $F_d(t)$ зависит от выбранного алгоритма обслуживания “ячеек” на поверхности Земли (положение “ячейки” связано с соответствующим углом α_k видимости ее центра из точки положения КА, как показано на рис. 5). Этот алгоритм должен учитывать достижение необходимой информационной скорости в каждой “ячейке” и передачу заданного объема информации для заданного числа АТ за время Δt_k (с учетом “коэффициента переподписки” [14]), орбитальные параметры движения КА и, естественно, принятое число групп M и число излучателей m в группе при физической реализации АФАР КА.

Видимо, аналогичный подход к минимизации энергопотребления АФАР КА принят на спутни-

ках Starlink, что косвенно следует из заявки в FCC [6] для системы первого поколения (Starlink Gen 1).

Простейшим случаем алгоритма обхода “ячеек” лучом АФАР КА является обслуживание одной заданной “ячейки” в течение всего сеанса связи T (рис. 6).

При условии, что изменение количества включенных излучателей происходит с дискретом m , а время для включения (выключения) групп излучателей пренебрежимо мало, получим для этого гипотетического случая, что энергия потребления АФАР дискретно увеличивается по мере отклонения луча от надира на дискретные значения, т.е. зависит от $\Delta\alpha_i$:

$$Q(\Delta\alpha_i) = P_0T + 2mw(\Delta t_2 + 2\Delta t_3 + 3\Delta t_4 + \dots + (M-1)\Delta t_M), \quad (17)$$

где $P_0 = Mmw/\xi$.

Снижение энергии, потребляемой АФАР КА, за счет выключения излучателей может достигать за сеанс связи T при максимальном отклонении луча от надира $\alpha_{\max}$ значения:

$$\begin{aligned} Q_{\max}/Q(\alpha_{\max}) &= P_0T\xi/\{P_0T + 2mw(\Delta t_2 + 2\Delta t_3 + 3\Delta t_4 + \dots + (K-1)\Delta t_M)\} = \\ &= \xi/\left(1 + 2mw\sum_{i=2}^K(i-1)\Delta t_i/P_0T\right), \end{aligned} \quad (18)$$

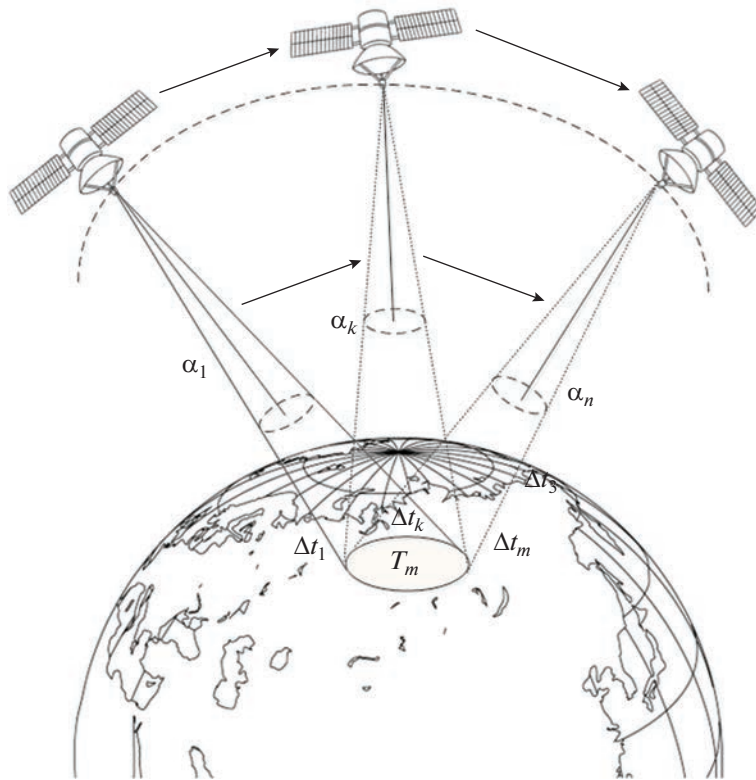


Рис. 6. Обслуживание одной «ячейки» в течение всего сеанса связи.

где обозначено $M(\alpha_{\max}) = K$ число переключаемых групп излучателей.

С целью примерной численной оценки достижимого снижения энергии потребления АФАР, а следовательно, и тепловыделения можно приять, что интервалы времени Δt_{i+1} в (18), в которые происходит переключение одной группы излучателей, примерно равны $2\Delta t \approx (T - 2\Delta t_1)/M(\alpha_{\max})$ по мере удаления луча от надира:

$$\begin{aligned} Q_{\max}/Q(\alpha_{\max}) &= \xi / \left[1 + \frac{mwK}{P_0} \left(1 - \frac{2\Delta t_1}{T} \right) \right] = \\ &= \xi / \left[\xi - \frac{2\Delta t_1}{T} (\xi - 1) \right], \end{aligned} \quad (19)$$

где $2\Delta t_1$ — интервал времени, в пределах которого луч находится в области надира и включения дополнительных излучателей не требуется (см. рис. 4), и K много более 1.

Если предположить, что число переключаемых групп излучателей АФАР стремится к N , определенному в (9), то в пределе достигается снижение энергопотребления и тепловыделения $Q_{\max}/Q(\alpha_{\max}) = \xi$, что следует из (19) и ранее было установлено в (15).

Еще раз следует отметить, что для многолучевой АФАР технология включения (выключения) излучателей с целью минимизации энергопо-

требления неприменима, поскольку каждый излучатель АФАР участвует в формировании каждого луча (например, [15]).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При отключении (включении) части излучателей однолучевой передающей АФАР КА в зависимости от изменения угла видимости обслуживаемой «ячейки» можно достичь заметного снижения ее энергопотребления, а, следовательно, и тепловыделения. В пределе это снижение приближается к ξ (рис. 3). При этом следует учитывать, что каждая передающая АФАР в составе полезной нагрузки КА (их, как правило, несколько) должна формировать один «прыгающий» луч, максимальный угол сканирования которого $\alpha_{\max}$ задается принятым минимальным рабочим углом $\beta_{\min}$ для АФАР АТ.

Следует отметить, что в приемной АФАР КА нет необходимости включать (выключать) излучатели и она может формировать в одной апертуре несколько лучей (равное числу передающих лучей), которые «прыгают» синхронно с передающими лучами.

В общем случае для определения зависимости энергопотребления передающей АФАР КА от текущего времени t с учетом алгоритма информа-

ционного обслуживания “ячеек” необходимо для каждого конкретного случая (системы) выполнять имитационное моделирование с учетом движения КА.

Это системная задача и, как показал ее предварительный анализ, она имеет конкретное решение для конкретной низкоорбитальной спутниковой системы ШПД или системы типа “Direct-to-Device”.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Урличич Ю.М. // Первая миля. 2021. № 3. С. 14.
2. Анпилогов В.Р. // Технологии и средства связи. 2013. № 5. С. 66.
3. Анпилогов В.Р. // Технологии и средства связи. 2015. № 4. С. 62.
4. Анпилогов В.Р., Шишов А.В., Эйдус А.Г. // Технологии и средства связи. 2015. № 6—2. С. 14.
5. Анпилогов В.Р., Денисенко В., Зимин И. и др. // Первая миля. 2019. № 3. С. 16.
6. Анпилогов В.Р., Пехтерев С.В., Шишов А.В. // Технологии и средства связи. 2020. № S1. С. 69.
7. Анпилогов В.Р., Пехтерев С., Шишов А.В. // Технологии и средства связи. Спец. вып. “Спутниковая связь и вещание 2022”. 2021. С. 30.
8. Анпилогов В.Р., Денисенко В.В., Левитан Б.А. и др. // Технологии и средства связи. 2022. № 6—2. С. 26.
9. Lua W., Lia J., Miao J. et al. // Functional Dianond. 2021. V. 1. № 1. P. 189.
10. Su Q., Liu J., Xue X., Shi Z. // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. V. 2083. P. 1.
11. 3GPP TR 21.917 V17.0.1 (2023-01). 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; Release 17 Description; Summary of Rel-17 Work Items (Release 17). Valbonne: 3GPP Organizational Partners. 2022.
12. FCC Report. Database Report/Search Tool for FCC Information. <https://fcc.report/IBFS/SAT-LOA-20210511-00064>.
13. Rec. ITU-R SF.1482. Maximum allowable values of power flux-density (pfd) produced at the Earth's surface by non-GSO satellites in the FSS operating in the 10.7–12.75 GHz band. Geneva: ITU, 2000.
14. Анпилогов В.Р., Афонин А.А. // Электросвязь. 2011. № 7. С. 45.
15. Шишов А. В., Левитан Б. А., Топчиев С.А. и др. // Журн. радиоэлектроники. 2018. № 7. С. 1.