

МОДЕЛЬ ПРИМЕНЕНИЯ АВИАЦИОННОГО МОДУЛЯ НАРУШЕНИЯ ДОСТУПНОСТИ АБОНЕНТСКИХ ТЕРМИНАЛОВ СОТОВОЙ СВЯЗИ ДЛЯ КРУГОВОЙ ТРАЕКТОРИИ ПОЛЕТА

А. А. Бойко, С. А. Гриценко

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

Поступила в редакцию 18.06.2013 г.

Аннотация. Получены аналитические зависимости для различных пространственных и энергетических характеристик функционирования абонентских терминалов, базовых станций и модуля нарушения доступности абонентских терминалов сотовой связи, установленного на беспилотном летательном аппарате с круговой траекторией барражирования в заданном районе.

Ключевые слова: доступность, мобильная связь, алгоритмический критерий, пространственный критерий, беспилотный летательный аппарат.

Annotation. Analytical expressions for different space and energetic characteristics of mobile stations, base stations and mobile communication blocking module, which set on unmanned aerial vehicle with circle patrol track in purpose area, are received.

Keywords: accessibility, mobile communication, algorithmic criteria, space criteria, unmanned aerial vehicle.

ВВЕДЕНИЕ

В интересах обеспечения информационной безопасности сегодня используются программно-технические средства, способные скрытно нарушать доступность абонентских терминалов (АТ) сотовой связи. При стационарном размещении на территориально распределенных объектах данные средства могут иметь недостаточную эффективность. По этой причине все большее применение находят авиационные модули нарушения доступности АТ сотовой связи (далее – АМ), устанавливаемые на беспилотных летательных аппаратах (БЛА).

В известных работах [1, 2] рассматривается статичное положение БЛА, несущего АМ, а обеспечиваемая им зона «отчуждения» определяется только с позиции энергетической доступности АТ. Однако на практике существенное влияние на эффективность применения АМ оказывают изменяющиеся во времени высота, скорость и траектория полета БЛА, ширина диаграммы направленности антенны (ДНА), а также местоположение и энергетические характеристики АТ и конкурирующих с АМ базовых

станций (БС) в заданном районе. Кроме того эффективное применение АМ невозможно без выполнения алгоритмического критерия перехода АТ под его управление, энергетическая доступность в котором имеет важное, но не решающее значение.

Цель работы – обоснование модели применения авиационного модуля нарушения доступности абонентских терминалов сотовой связи, учитывающей изменяющиеся во времени пространственные и энергетические характеристики функционирования данного модуля, абонентских терминалов и базовых станций в заданном районе.

1. СОСТАВ МОДЕЛИ

В модели применения АМ рассматривается традиционный для средств радиоподавления двухсторонний антагонистический информационный конфликт [3]. С одной стороны в конфликте участвует БЛА с АМ и модулями определения местоположения, связи с наземным пунктом управления (НПУ), системы автоматического управления (САУ) БЛА и оценки радиоэлектронной обстановки (РЕО). Задача этой стороны заключается в переводе находящихся в заданном районе АТ под управление

АМ и недопущении для них возможности установить соединение. С другой стороны в конфликте участвуют БС и АТ с задачей обеспечения устойчивой связи абонентов.

2. АЛГОРИТМИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ

После включения m -й АТ ($m = 1..M$, где M – количество АТ в заданном районе) переходит под управление k -й БС ($k = 1..K$, где K – количество энергетически доступных в заданном районе БС) или АМ при выполнении следующего алгоритмического критерия [4]:

$$S_{k(AM)} \wedge B_{k(AM)} \wedge [C1_m(t) > 0] \wedge \wedge \max[C2_m(t)] = 1, \quad (1)$$

где $S_{k(AM)}$ – показатель принадлежности соты k -й БС (АМ) к сети m -го АТ ($S_{k(AM)} = 1$ – принадлежит); $B_{k(AM)}$ – показатель доступности соты k -й БС (АМ) ($B_{k(AM)} = 1$ – сота доступна); $C1_m(t)$ – показатель доступности радиоканала для m -го АТ; $C2_m(t)$ – показатель привлекательности соты для m -го АТ.

Аналитические отношения для критериев $C1_m(t)$ и $C2_m(t)$ в соответствии с [4] в наиболее общем случае имеют следующий вид:

$$C1_m(t) = \mathbf{ARXL}_m(t) - \mathbf{RLAM}_{\text{BC}_k(AM)}(t); \quad (2)$$

$$C2_m(t) = C1_m(t) + \mathbf{CRO}_{\text{BC}_k(AM)}(t),$$

где $\mathbf{ARXL}_m(t)$ – адаптивно меняющийся средний уровень принимаемого m -м АТ сигнала; $\mathbf{RLAM}_{\text{BC}_k(AM)}(t)$ – минимальный уровень принимаемого АТ сигнала, при котором k -я БС (АМ) разрешает доступ в сеть; $\mathbf{CRO}_{\text{BC}_k(AM)}(t)$ – уровень компенсации критерия переВыбора соты k -й БС (АМ).

$\mathbf{ARXL}_m(t)$ зависит от местоположения АТ и БС (АМ). Для его оценки с учетом дальности между приемником и передатчиком, не превышающей расстояние прямой видимости, и согласованными ДНА, используется отношение, учитывающее основные потери передачи в свободном пространстве [5, 6]:

$$\mathbf{ARXL}_m(t) = 10 \lg [P_{\text{BC}_k(AM)}(t) \cdot G_{\text{BC}_k(AM)}(t) \cdot G_m(t)] - \quad (3)$$

$$-92,44 - 20 \lg [f \cdot R_{\text{BC}_k(\text{БЛА})_AT_m}(t)],$$

где $P_{\text{BC}_k(AM)}$ – мощность излучаемого k -й БС (АМ) сигнала; $G_{\text{BC}_k(AM)}(t)$ и $G_m(t)$ – коэффициенты направленного действия антенн k -й БС (АМ) и m -го АТ соответственно; f – частота и излучаемого радиосигнала [ГГц]; $R_{\text{BC}_k(\text{БЛА})_AT_m}(t)$ – расстояние от излучателя до

приемника на трассе « k -я БС (АМ) – m -й АТ» [км].

При необходимости значения коэффициентов потерь при передаче в (3) могут быть уточнены в соответствии с [6].

Задачей АМ является обеспечение таких значений $P_{AM}(t)$ и $R_{\text{БЛА_AT}_m}(t)$, при которых для каждого АТ $C2_m(t)$ будет превышать значения аналогичных показателей БС, под управлением которых может находиться этот АТ в заданном районе. АМ должен излучать радиосигнал на одной из частот БС, находящихся по соседству с БС, под управлением которой находится m -й АТ [4]. Такая частота выбирается из условия либо отсутствия на входе приемного тракта АТ каких-либо сигналов от БС, под управлением которой этот АТ находится, либо на данной частоте управляющая m -м АТ БС может излучать, но уровень ее сигнала для АТ не является максимальным из списка частот соседних БС. Исходя из этого, алгоритмическим критерием перехода АТ под управление АМ является:

$$[\max_{k=1..K} [10 \lg [P_{\text{BC}_k}(t) \cdot G_{\text{BC}_k}(t) \cdot G_m(t)] - 92,44 - 20 \lg [f \cdot R_{\text{BC}_k_AT_m}(t)] - \mathbf{RLAM}_{\text{BC}_k}(t) + \mathbf{CRO}_{\text{BC}_k}(t)] < 10 \lg [P_{AM}(t) \cdot G_m(t) \cdot G_{AM}(t)] - 92,44 - 20 \lg [f \cdot R_{\text{БЛА_AT}_m}(t)] - \mathbf{RLAM}_{AM} + \mathbf{CRO}_{AM}] \wedge \wedge (\mathbf{ARXL}_m(t) + \psi \leq 10 \cdot \lg [P_{AM}(t) \cdot G_{AM}(t) \cdot G_m(t)] - 92,44 - 20 \lg [f \cdot R_{\text{БЛА_AT}_m}(t)]) = 1, \quad (4)$$

где ψ – показатель необходимого превышения формируемого АМ сигнала над уровнем сигнала БС.

Проверку выполнения данного критерия возможно осуществлять только в случае, когда АТ находится в зоне, накрываемой ДНА АМ. Поэтому в дополнение к алгоритмическому следует учитывать пространственный критерий.

3. ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ КРИТЕРИЙ

Для определения параметров зоны, накрываемой ДНА АМ, рассмотрим представленную на рисунке 1 геометрическую модель его применения, в которой полет БЛА осуществляется по круговой траектории.

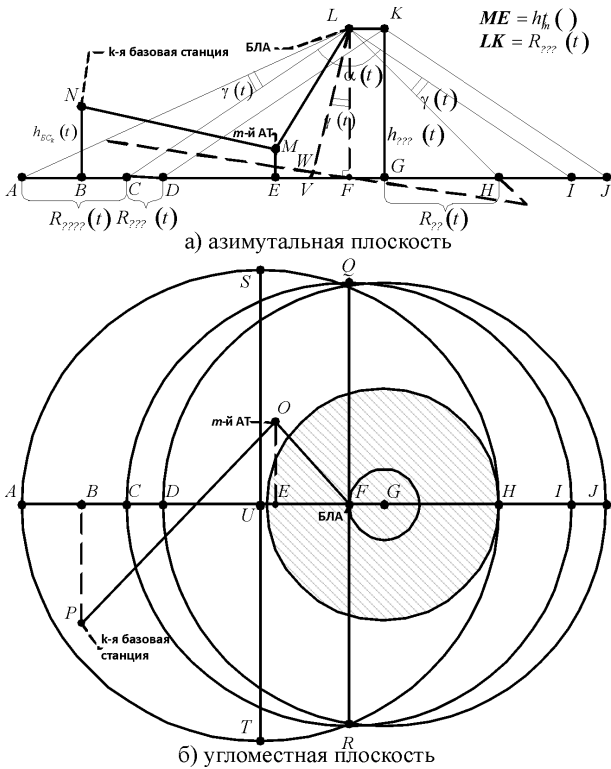


Рис. 1. Геометрическая модель применения АМ

БЛА барражирует на высоте $h_{\text{БЛА}}(t)$ по окружности с радиусом $R_{\text{БЛА}}(t)$ и скоростью $v_{\text{БЛА}}(t)$. Точка G соответствует проекции на земной поверхности центра окружности, по которой барражирует БЛА.

Учитываемые в формуле (4) расстояния $R_{\text{БС}_k\text{-АТ}_m}(t)$ и $R_{\text{БЛА}_k\text{-АТ}_m}(t)$ в трехмерном линейном пространстве определяются формулой:

$$R_{\text{БС}_k(\text{БЛА})\text{-АТ}_m}(t) = \sqrt{(x_{\text{БС}_k(\text{БЛА})}(t) - x_m(t))^2 + (y_{\text{БС}_k(\text{БЛА})}(t) - y_m(t))^2 + (h_{\text{БС}_k(\text{БЛА})}(t) - h_m(t))^2} \quad (5)$$

ДНА АМ по уровню половинной мощности имеет конусообразную форму, и ее проекция на земной поверхности при положении БЛА в точке L образует круг с радиусом:

$$CF = FI = h_{\text{БЛА}}(t) \cdot tg \frac{\alpha(t)}{2}, \quad (6)$$

где $\alpha(t)$ – ширина ДНА АМ.

Однако в полете БЛА имеет крен, который определяется углом $\gamma(t)$ отклонения оси симметрии БЛА от вертикального положения по отношению к поверхности земли:

$$\gamma(t) = \arctg \frac{v_{\text{БЛА}}^2(t)}{R_{\text{БЛА}}(t) \cdot g}, \quad (7)$$

где $g = 9,807 \text{ м/с}^2$ – гравитационная постоянная.

Поэтому на практике проекция на земной поверхности ДНА АМ образует показанный на рисунке 1б эллипс с большой АН и малой ST диагоналями. При этом малая диагональ полученного эллипса ST больше отрезка QR, являющегося диаметром круга, образуемого рассматриваемой ДНА без учета крена, т.к. расстояние по биссектрисе между вершиной конуса и точкой на земной поверхности при крене увеличивается. Для вычисления диагонали ST необходимо знать высоту конуса после учета крена БЛА, т.е. длину отрезка LV. Найдем ее, зная, что треугольник ΔVLF прямоугольный. Длину отрезка VF можно вычислить по формуле:

$$VF = h_{\text{БЛА}}(t) \cdot tg \gamma(t). \quad (8)$$

Поскольку отрезок VW и отрезок WL, равный $h_{\text{БЛА}}(t)$, составляют гипотенузу ΔVLF , то длина искомого отрезка вычисляется по формуле:

$$LV = \sqrt{VF^2 + LF^2} = \sqrt{(h_{\text{БЛА}}(t) \cdot tg \gamma(t))^2 + h_{\text{БЛА}}^2(t)}. \quad (9)$$

Зная, что ширина ДНА при крене не изменилась, найдем диагональ ST:

$$ST = 2 \cdot tg \frac{\alpha}{2} \cdot LV = 2 \cdot tg \frac{\alpha}{2} \times \sqrt{(h_{\text{БЛА}}(t) \cdot tg \gamma(t))^2 + h_{\text{БЛА}}^2(t)}. \quad (10)$$

Зная, что треугольники ΔALF и ΔFLH прямоугольные, получим аналитическое отношение для большой диагонали эллипса АН:

$$AH = FH + AF = h_{\text{БЛА}}(t) \cdot \left[tg \left(\frac{\alpha}{2} - \gamma(t) \right) + tg \left(\frac{\alpha}{2} + \gamma(t) \right) \right]. \quad (11)$$

Тогда уравнение эллипса, образуемого ДНА АМ, с учетом (7) имеет вид:

$$\frac{x^2}{\frac{h_{\text{ЦН}}^2(t)}{4} \cdot \left[\operatorname{tg} \left(\frac{\alpha(t)}{2} - \operatorname{arctg} \frac{v_{\text{БЛА}}^2(t)}{R_{\text{БЛА}}(t) \cdot g} \right) + \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha(t)}{2} + \operatorname{arctg} \frac{v_{\text{БЛА}}^2(t)}{R_{\text{БЛА}}(t) \cdot g} \right) \right]^2} + \frac{y^2}{\operatorname{tg}^2 \frac{\alpha(t)}{2} \cdot \left(\left(h_{\text{ЦН}}(t) \cdot \operatorname{tg} \left[\operatorname{arctg} \frac{v_{\text{БЛА}}^2(t)}{R_{\text{БЛА}}(t) \cdot g} \right] \right)^2 + h_{\text{ЦН}}^2(t) \right)} = 1. \quad (12)$$

Выражение (12) описывает зону u , в которой в некоторый фиксированный момент времени АТ могут быть пространственно доступны для АМ.

Поскольку БЛА движется по окружности с радиусом $R_{\text{БЛА}}(t)$, то ДНА АМ меняет свое местоположение во времени. В процессе движения образуется т.н. «зона гарантированного геометрического покрытия». Эта зона при условии $h_{\text{БЛА}}(t) \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha}{2} - \gamma(t) \right) > R_{\text{БЛА}}(t)$ представляет собой круг с центром в центре окружности, соответствующей траектории полета БЛА, и радиусом $R_{\text{ин}}(t)$:

$$\begin{aligned} R_{\text{ин}}(t) &= \\ &= h_{\text{БЛА}}(t) \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha}{2} - \gamma(t) \right) - \\ &\quad - R_{\text{БЛА}}(t). \end{aligned} \quad (13)$$

Однако попадание m -го АТ в данную зону не гарантирует выполнения для него энергетического критерия (4) ввиду того, что в ней могут находиться БС.

Предположим, что заданный район имеет форму прямоугольника, угловые точки которого находятся в 1 и 4 четверти декартовой системы координат симметрично относительно оси Ox . Центр окружности барражирования БЛА размещается в геометрическом центре заданного района, т.е. смещен по Ox на $x_0(t)$. В процессе движения БЛА по окружности m -й АТ, находящийся в заданном районе в точке с координатами $\langle x_m(t), y_m(t) \rangle$, (см. рисунок 2) может находиться в зоне досягаемости ДНА АМ (быть пространственно доступным для АМ) в течение временного интервала, определяемого формулой:

$$\begin{aligned} \Delta t_m(t) &= \frac{\Delta \varphi_m(t) \cdot R_m(t)}{v_m(t)}, \\ \Delta \varphi_m(t) &= |\varphi_{m1}(t) - \varphi_{m2}(t)|, \end{aligned} \quad (14)$$

где $\varphi_{m1}(t)$ и $\varphi_{m2}(t)$ – полярные углы равноудаленных от центра окружности барражирования БЛА G точек, образующих показанную на рисунке 2 штриховой линией дугу, по которой виртуально перемещается m -й АТ во время накрытия его движущимся эллипсом ДНА АМ с линейной скоростью $v_m(t)$.

Зная, что координаты $\langle x_m(t), y_m(t) \rangle$ и $\langle x_0(t), 0 \rangle$ являются исходными данными для моделирования и $R_m(t) = \sqrt{(x_m(t) - x_0(t))^2 + y_m^2(t)}$, найдем угол $\Delta \varphi_m$ из формулы вычисления длины хорды между точками пересечения эллипса и окружности с радиусом $R_m(t)$ (точки АТ_{m1} и АТ_{m2}):

$$\begin{aligned} \Delta \varphi_m(t) &= 2 \arcsin \left(\frac{1}{2 \cdot R_m(t)} \times \right. \\ &\quad \left. \times \sqrt{(x_{m1}(t) - x_{m2}(t))^2 + (y_{m1}(t) - y_{m2}(t))^2} \right). \end{aligned} \quad (15)$$

Получим координаты точек пересечения окружности с радиусом $R_m(t)$ и центром в центре окружности барражирования БЛА и эллипсом ДНА АМ, центр диагоналей которого смещен относительно начала координат по оси Ox на величину $x_{\text{БЛА}}(t) = \mathbf{UG}$ (большая диагональ эллипса на оси Ox , малая на оси Oy). С учетом формул (11) и (13) эта величина равна:

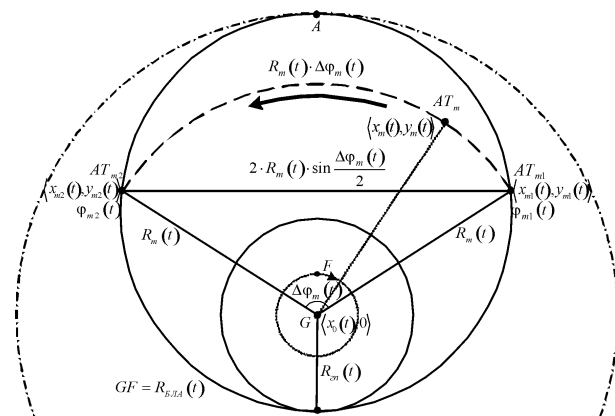


Рис. 2. Доступность АТ для ДНА АМ

$$\begin{aligned}
 x_{\text{БЛА}}(t) &= \mathbf{UG} = \frac{\mathbf{AH}}{2} - R_{\text{гн}}(t) = \\
 &= \frac{h_{\text{БЛА}}(t)}{2} \cdot \left[\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2} + \gamma(t)\right) - \right. \\
 &\quad \left. - \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2} - \gamma(t)\right) \right] - R_{\text{БЛА}}.
 \end{aligned} \tag{16}$$

Для получения координат точек АТ_{m1} и АТ_{m2} необходимо, используя формулу (12), получить решение следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} a^{-2}(x + x_{\text{БЛА}}(t) + x_0(t))^2 + b^{-2}y^2 = 1, \\ (x + x_0(t))^2 + y^2 = R_m^2(t), \end{cases} \tag{17}$$

где $a = \frac{1}{2} \cdot \mathbf{AH}$, $b = \frac{1}{2} \cdot \mathbf{ST}$.

Решение этой системы соответствует действительным координатам искомым точек АТ_{m1} и АТ_{m2}:

Если действительных значений нет, то либо точка лежит в «зоне гарантированного геометрического покрытия» ($R_m(t) \leq R_{\text{гн}}(t)$) и тогда $\Delta\varphi_m(t) = 2\pi$, либо АТ, находящийся в рассматриваемой точке, недоступен для АМ. Подставляя значения координат в (15), возможно получить отношение для длины дуги m -го АТ S_m с центральным углом $\Delta\varphi_m(t)$:

$$\begin{aligned}
 \widehat{S}_m &= 2 \cdot \arcsin \left[0,5 \cdot R_m^{-1}(t) \times \right. \\
 &\quad \left. \times \sqrt{(x_{m1}(t) - x_{m2}(t))^2 + (y_{m1}(t) - y_{m2}(t))^2} \right] \times \\
 &\quad \times R_m(t).
 \end{aligned} \tag{20}$$

Учитывая, что линейные скорости БЛА $v_{\text{БЛА}(m)}(t) = \omega_{\text{БЛА}(m)}(t) \cdot R_{\text{БЛА}(m)}(t)$, и перемещения m -го АТ по дуге S_m определяются как s_m а также, что угловая скорость БЛА $\omega_{\text{БЛА}}(t)$ равна угловой скорости $\omega_m(t)$, представляется возможным оценить временной интервал $\Delta t_m(t)$:

$$x_{m1(2)}(t) = \frac{\frac{x_0(t)}{b^2} - \frac{x_{\text{БЛА}}(t) + x_0(t)}{a^2} \pm \sqrt{\left(\frac{x_{\text{БЛА}}(t) + x_0(t) - x_0(t)}{a^2} - \left(\frac{1}{a^2} - \frac{1}{b^2} \right) \times \right.}{a^{-2} - b^{-2}} \left. \times \left(\left(\frac{x_{\text{БЛА}}(t) + x_0(t)}{a^2} \right)^2 + \frac{R_m^2(t)}{b^2} - \frac{x_0^2(t)}{b^2} - 1 \right) \right)}{a^{-2} - b^{-2}}; \tag{18}$$

$$y_{m1(2)}(t) = \pm \left(R_m^2(t) - \left(\frac{x_0(t)}{b^2} - \frac{x_{\text{БЛА}}(t) + x_0(t)}{a^2} + \sqrt{\left(\frac{x_{\text{БЛА}}(t) + x_0(t) - x_0(t)}{a^2} - \left(\frac{1}{a^2} - \frac{1}{b^2} \right) \times \right. \right. \right. \right. \\
 \left. \left. \left. \times \left(\left(\frac{x_{\text{БЛА}}(t) + x_0(t)}{a^2} \right)^2 + \frac{R_m^2(t)}{b^2} - \frac{x_0^2(t)}{b^2} - 1 \right) \right) \cdot \left(\frac{1}{a^2} - \frac{1}{b^2} \right)^{-1} + x_0(t) \right)^2 \right)^{1/2}; \tag{19}$$

$$y_{m1(2)}(t) = \pm \left(R_m^2(t) - \left(\frac{x_0(t)}{b^2} - \frac{x_{\text{БЛА}}(t) + x_0(t)}{a^2} - \sqrt{\left(\frac{x_{\text{БЛА}}(t) + x_0(t) - x_0(t)}{a^2} - \left(\frac{1}{a^2} - \frac{1}{b^2} \right) \times \right. \right. \right. \right. \\
 \left. \left. \left. \times \left(\left(\frac{x_{\text{БЛА}}(t) + x_0(t)}{a^2} \right)^2 + \frac{R_m^2(t)}{b^2} - \frac{x_0^2(t)}{b^2} - 1 \right) \right) \cdot \left(\frac{1}{a^2} - \frac{1}{b^2} \right)^{-1} + x_0(t) \right)^2 \right)^{1/2}.$$

$$\Delta t_m(t) = 2 \cdot \frac{R_{\text{БЛА}}(t)}{v_{\text{БЛА}}(t)} \times \arcsin(0.5 \cdot R_m^{-1}(t) \times \sqrt{(x_{m1}(t) - x_{m2}(t))^2 + (y_{m1}(t) - y_{m2}(t))^2}). \quad (21)$$

Следовательно, пространственным критерием перехода АТ под управление АМ является попадание АТ в зону, границы которой описываются уравнением образованного ДНА эллипса, каждая точка которого вращается с неизменной собственной линейной скоростью по окружности с центром в центре окружности барражирования БЛА и радиусом, равным расстоянию от этого центра до данной точки.

4. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ

Эффективность АМ по аналогии с [6] предлагается определять как отношение количества безуспешных соединений множества АТ в заданном районе относительно количества всех (успешных и безуспешных) соединений этих АТ в течение требуемого временного интервала. При этом безуспешным признается соединение в случае, когда его установить не удалось.

Задавая $T_{\text{зад}}$, оценку эффективности АМ как вероятности нарушения доступности информации заданного множества АТ предлагается осуществлять с использованием следующего отношения:

$$= \frac{B \cdot \mathcal{E}_{\text{тех}}}{2\pi T} \times \int_0^T (R^{-1}(t) \cdot M^{-1}(t) \times \left. \begin{aligned} &\times v(t) \cdot \sum_{m=1}^{M(t)} [Q_m(t) \cdot A_m(t)] \right) dt, \quad (22) \\ Q_m(t) &= \begin{cases} \Delta t_m(t) + \tau_{3_m}, & \text{если } \Delta t_m(t) + \tau_{3_m} \leq 2\pi \cdot R_{\text{БЛА}}(t) \cdot v_{\text{БЛА}}^{-1}(t); \\ 2\pi \cdot R_{\text{БЛА}}(t) \cdot v_{\text{БЛА}}^{-1}(t), & \text{если } \Delta t_m(t) + \tau_{3_m} > 2\pi \cdot R_{\text{БЛА}}(t) \cdot v_{\text{БЛА}}^{-1}(t); \\ 0, & \text{если алгоритмический критерий для } m\text{-го АТ не выполнен;} \\ 1, & \text{если алгоритмический критерий для } m\text{-го АТ выполнен;} \end{cases} \\ A_m(t) &= \begin{cases} 0, & \text{если алгоритмический критерий для } m\text{-го АТ не выполнен;} \\ 1, & \text{если алгоритмический критерий для } m\text{-го АТ выполнен;} \end{cases} \end{aligned}$$

$$B = \begin{cases} 1, & \text{если } \frac{2 \cdot \pi}{T_{\text{БЛА}}^2} \cdot \int_0^{T_{\text{БЛА}}} \frac{R_{\text{БЛА}}(t)}{v_{\text{БЛА}}(t)} dt \geq 1; \\ T_{\text{БЛА}}^2 \cdot \left(2 \cdot \pi \cdot \int_0^{T_{\text{БЛА}}} \frac{R_{\text{БЛА}}(t)}{v_{\text{БЛА}}(t)} dt \right)^{-1}, & \\ \text{если } \frac{2 \cdot \pi}{T_{\text{БЛА}}^2} \cdot \int_0^{T_{\text{БЛА}}} \frac{R_{\text{БЛА}}(t)}{v_{\text{БЛА}}(t)} dt < 1; \end{cases}$$

$$\mathcal{E}_{\text{тех}} = \frac{\int_0^{T_{\text{зад}}} [\Omega_{\text{БЛА}}(t) \cdot \Omega_{\text{САУ}}(t) \cdot \Omega_{\text{мест}}(t)] dt}{T_{\text{зад}} \cdot (\tau + \tau_{\text{ц}}) \cdot (T_{\text{зад}} - \tau - \tau_{\text{ц}})} \times \int_0^{\tau + \tau_{\text{ц}}} [\Omega_{\text{св}}(t) \cdot \Omega_{\text{РЭО}}(t)] dt \cdot \int_{\tau + \tau_{\text{ц}}}^{T_{\text{зад}}} \Omega_{\text{АМ}}(t) dt,$$

где $Q_m(t)$ – показатель выполнения пространственного критерия; $A_m(t)$ – показатель выполнения алгоритмического критерия; $\mathcal{E}_{\text{тех}}(t)$ – показатель общей технической эффективности элементов, входящих в БЛА; $\tau_{\text{ц}}$ – интервал времени целераспределения с момента получения на НПУ результатов оценки РЭО до принятия АМ целеуказаний; $\Omega_{\text{БЛА}}(t)$ – показатель надежности агрегатов БЛА; $\Omega_{\text{САУ}}(t)$, $\Omega_{\text{мест}}(t)$, $\Omega_{\text{св}}(t)$, $\Omega_{\text{РЭО}}(t)$, $\Omega_{\text{АМ}}(t)$ – показатели надежности программного, информационного и технического обеспечения САУ БЛА, модулей определения местоположения БЛА, связи с НПУ, оценки РЭО и АМ, соответственно.

Применение с использованием метода имитационного моделирования изложенных аналитических зависимостей для различных наборов исходных данных позволяет получить ряд зависимостей (примеры показаны на рисунках 3-4).

Для проверки адекватности модели использован метод сравнения с результатами натурных испытаний. В частности, моделью подтверждено полученное на практике наибольшее значение показателя $\mathcal{E}_{\text{АМ}}$ при $v_{\text{БЛА}} = 100$ км/ч.

Таким образом, предложенные аналитические зависимости могут быть использованы для обеспечения адаптивного управления энергетическими характеристиками авиационного модуля нарушения доступности абонентских терминалов сотовой связи и пространственными характеристиками беспилотного летательного аппарата с круговой траекторией барражирования в заданном районе в интересах поддержания неизменного во времени уровня требуемой эффективности их комплексного

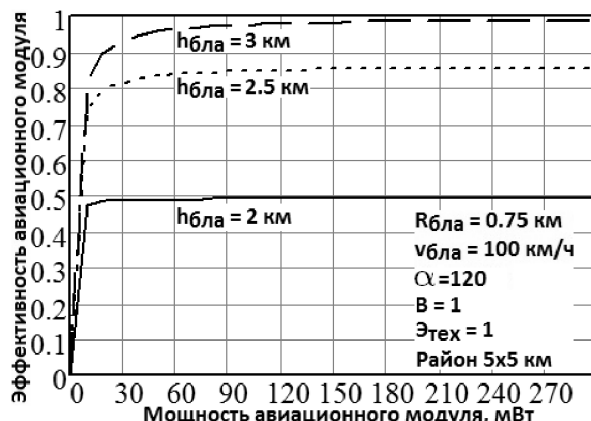
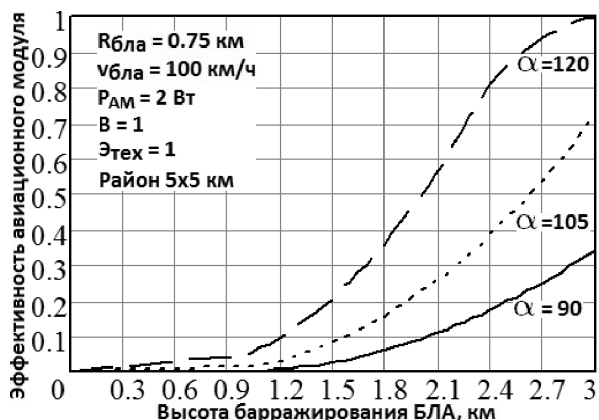


Рис. 3. Зависимости эффективности АМ от $h_{\text{БЛА}}$ и $P_{\text{АМ}}$

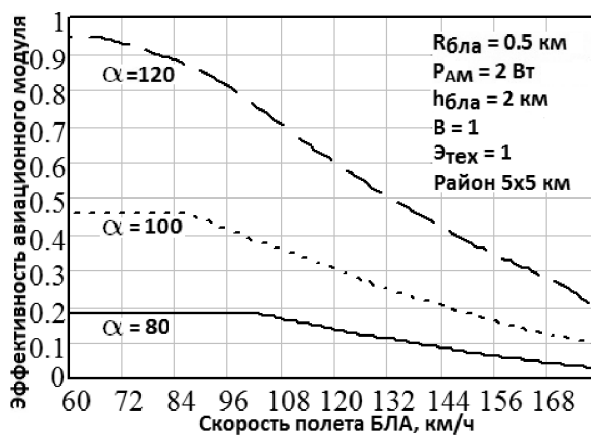
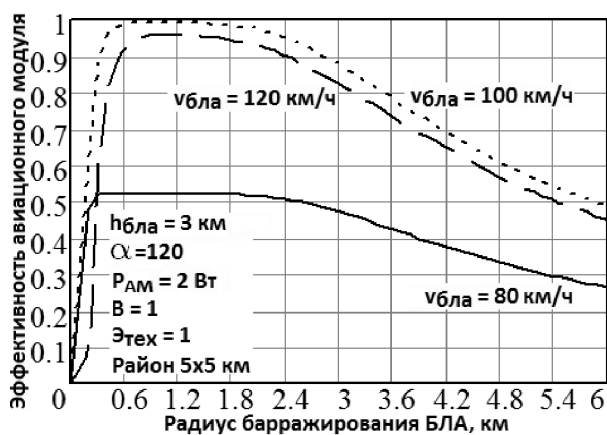


Рис. 4. Зависимости эффективности АМ от $R_{\text{БЛА}}$ и $v_{\text{БЛА}}$

применения по назначению при различных пространственных и энергетических характеристиках функционирования абонентских терминалов и базовых станций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Леньшин А.В.* Методика моделирования отношения мощностей сигналов базовой станции и блокиратора абонентских терминалов в диапазонах частот систем подвижной радиосвязи / А.В. Леньшин, В.П. Лихачев, Э.Б. Ханов // Журнал «Теория и техника радиосвязи», № 1, 2012. С. 9–12.
2. *Лихачев В.П.* Методика расчета мощности авиационного модуля блокирования мобильной связи / Э.Б. Ханов, В.П. Лихачев // Журнал «Успехи современной радиоэлектроники», № 4, 2012. С. 55–59.

Бойко Алексей Александрович – кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника отдела Военного учебно-научного центра

3. *Владимиров В.И.* Антагонистический конфликт радиоэлектронных систем. Методы и математические модели. / В.И. Владимиров, В.П. Лихачев, В.М. Шляхин. – М.: Радиотехника, 2004. – 384 с.

4. *Digital cellular telecommunications system (Phase 2+).* Radio subsystem link control (version 8.5.0 Release 1999). ETSI.

5. *Попов В.И.* Основы сотовой связи стандарта GSM. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 296 с.

6. *Рекомендация МСЭ-R P.1812.* Метод прогнозирования распространения сигнала на конечной трассе для наземных служб «из пункта в зону» в диапазонах УВЧ и ОВЧ (Вопрос МСЭ-R 203/3). – Ассамблея радиосвязи МСЭ, 2007.

7. *РД 45.254-2002.* Сети сотовой подвижной связи. Нормы на показатели качества услуг связи и методики проведения их оценочных испытаний – М.: Минсвязи России, 2002. – 48 с.

Bouko A. A. – Ph.D., associate professor, assistant chief of the department of Military education-science center of Military aviation forces

Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж). Тел.: 8-908-139-67-44. E-mail: algeminy@mail.ru

Гриценко Сергей Александрович – научный сотрудник Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж). Тел.: 8-950-770-15-72. E-mail: sergei_gricenko@bk.ru

“Military aviation academy named for prof. N.E. Zhukovsky and J.A. Gagarin” (Voronezh). Tel: 8-908-139-67-44. E-mail: algeminy@mail.ru

Gricenko S. A. – researcher of Military education-science center of Military aviation forces “Military aviation academy named for prof. N.E. Zhukovsky and J.A. Gagarin” (Voronezh). Tel.: 8-950-770-15-72. E-mail: sergei_gricenko@bk.ru