

# МОДЕЛИРОВАНИЕ БЛОКИРОВКИ ПРЯМОЙ ВИДИМОСТИ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ НА МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛНАХ В СЕТЯХ AIR-TO-EVERYTHING<sup>1</sup>

**Э.М. Хайров**

*Российский университет дружбы народов*  
Россия, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6  
E-mail: [hajrov.emil@yandex.ru](mailto:hajrov.emil@yandex.ru)

**Е.Г. Медведева**

*Российский университет дружбы народов*  
Россия, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6  
E-mail: [medvedeva-eg@rudn.ru](mailto:medvedeva-eg@rudn.ru)

**Ю.В. Гайдамака**

*Российский университет дружбы народов*  
Россия, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6  
E-mail: [gaydamaka-yuv@rudn.ru](mailto:gaydamaka-yuv@rudn.ru)

**Ключевые слова:** миллиметровые волны, mmWave, прямая видимость, Line-of-Sight, LoS, Air-to-Everything, A2X, беспилотный летательный аппарат, БПЛА.

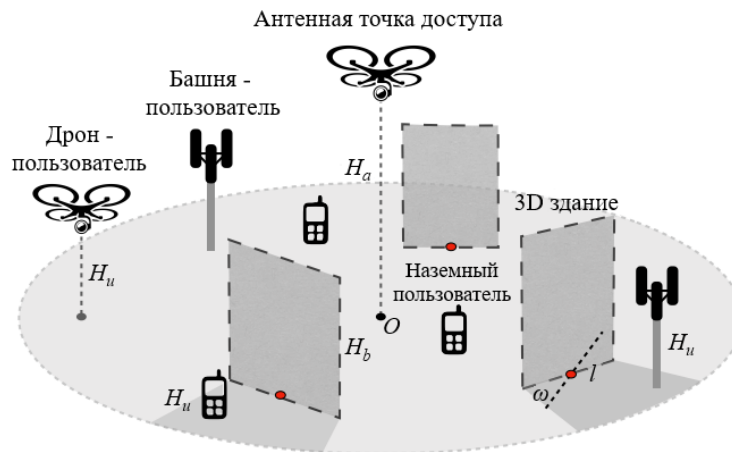
**Аннотация:** В работе построена модель для оценки площади области прямой видимости при установлении соединения в сети Air-to-Everything между точкой доступа, расположенной в воздушной среде (например, на беспилотном летательном аппарате), и пользовательскими устройствами как на поверхности земли, так и в воздухе. С использованием методов стохастической геометрии получены формулы зависимости площади области прямой видимости от высоты точки доступа, которая влияет на ключевой показатель качества передачи данных – вероятность блокировки соединения.

## 1. Введение

Сеть Air-to-Everything (A2X) использует антенные точки доступа (АТД), установленные на беспилотных летательных аппаратах (БПЛА) или дронах, для обеспечения беспрепятственного беспроводного подключения к пользователям различных типов (рис. 1). В таких сетях высокую скорость передачи данных могут обеспечить миллиметровые волны (mmWave) - технология передачи в диапазоне длин волн от 10 мм до 1 мм на соответствующих частотах от 30 ГГц до 300 ГГц. Однако, особенностью этих соединений, связанной с узкой направленностью антенн в сетях миллиметрового диапазона, является жесткая зависимость скорости в радиоканале от наличия прямой видимости (Line-of-Sight, LoS) между приемником и передатчиком [1,3]. Линия прямой видимости LoS между mmWave АТД на дроне и оборудованием

<sup>1</sup> Публикация подготовлена при поддержке Программы РУДН «5-100» и при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов №17-07-00845 и № 18-07-00576.

пользователя на поверхности или над поверхностью земли в городских условиях может быть заблокирована либо крупными стационарными объектами, такими как здания, либо небольшими объектами, как стационарными – столбы освещения, так и движущимися – люди, автомобили. В статье рассмотрен эффект блокировки соединения по нисходящему радиоканалу зданиями, случайным образом расположенными в зоне покрытия АТД. Методами стохастической геометрии определяется площадь области зоны покрытия, в которой существует прямая видимость АТД, в зависимости от высоты расположения АТД, параметров пользователей и расположения зданий в зоне покрытия АТД.



**Рис. 1.** Узлы сети A2X: АТД на дроне (высота  $H_a$ ) и оборудование пользователей (высота  $H_u$ ) – смартфоны, вышки сотовой связи, приемники на соседних дронах, а также здания (высота  $H_b$ ), блокирующие LoS.

## 2. Моделирование процесса взаимодействия устройств A2X

Пусть задана мощность передачи сигнала АТД  $P$  и расстояние до приемника сигнала  $r$ . Согласно [2] один из ключевых показателей качества передачи в радиоканале, отношение сигнал/шум (signal-to-noise ratio, SNR), имеет вид

$$P_r = \frac{Gr^{-\alpha}}{\sigma^2},$$

где  $\alpha$  – коэффициент затухания сигнала,  $r^{-\alpha}$  – простейшая модель распространения сигнала,  $\sigma^2$  – мощность теплового шума, нормированная мощностью передачи  $P$ ,  $G$  – усиление формирования луча. Предполагается, что пользователь подключается к АТД, если принимаемое отношение сигнал/шум превышает заданный порог  $\gamma$ . Заметим, что

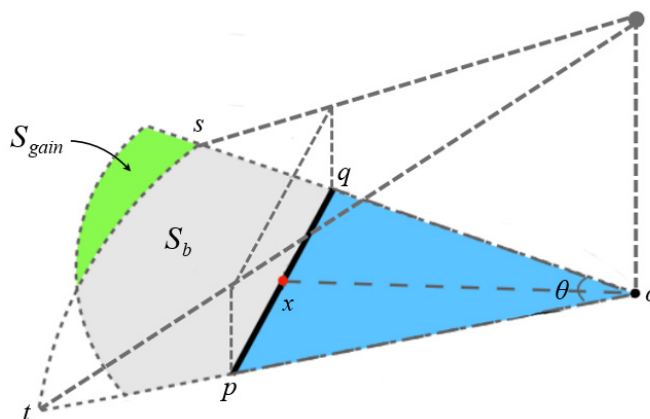
сфера покрытия АТД имеет максимальный радиус  $R_{\max} = \left( \frac{G}{\sigma^2 \gamma} \right)^{\frac{1}{\alpha}}$ .

Сечение сферы покрытия сигнала АТД плоскостью на высоте расположения пользовательского устройства  $H_u$  образует диск радиуса  $\Lambda_H = \sqrt{R_{\max}^2 - (H_a - H_u)^2}$ , называемый *эффективным диском покрытия* и обозначаемый  $O(\Lambda_H)$ . На рис. 2 центр диска обозначен  $o \in R^2$ . Пользователь подключается к АТД, если его местоположением является одна из точек эффективного диска покрытия, и существует прямая видимость

между передатчиком и приемником, т.е. линия прямой видимости не закрывается каким-либо объектом или зданием. Задача состоит в определении областей эффективного диска покрытия, в которых препятствием прямой видимости служит здание. В следующем разделе модель здания построена в виде части прямоугольной вертикальной плоскости с заданным центром, длиной, высотой и углом отклонения в горизонтальной плоскости (azimuth angle). Рассмотрена модель распространения сигнала между антенной точкой доступа и пользователем, находящимся за зданием.

### 3. Постановка задачи

Рассмотрим модель произвольно расположенного в зоне покрытия АТД здания в виде вертикального прямоугольника, границы проекции которого на плоскость пользовательских устройств находятся в точках  $p$  и  $q$ , а центр – в точке  $x$  (рис. 2). На рис. 2 показаны три части эффективного диска покрытия, образованного АТД с проекцией в т.  $o$ , на которые сектор диска с центром в т.  $o$ , радиусами, проведенными через точки  $p$  и  $q$ , и дугой  $st$ , разбивается зданием. Это расположенная перед зданием треугольная область  $opq$ , все точки которой имеют прямую видимость в АТД; расположенная за зданием и обозначенная  $S_b(x)$  область отсутствия прямой видимости; а также расположенная за зданием и обозначенная  $S_{gain}$  область прямой видимости, которая не перекрывается зданием из-за большой высоты расположения АТД относительно высоты здания. Также на рис. 3 показана область за зданием, где прямая видимость не перекрыта, но связь невозможна, поскольку область выходит за границы эффективного диска покрытия. Заметим, что передача данных в нисходящем радиоканале миллиметрового диапазона длин волн возможна для пользователей, находящихся в первой и третьей областях. Задача состоит в нахождении зависимости площади области  $S_{gain}$  от высоты расположения АТД при заданных моделях распространения сигнала и расположения зданий в зоне покрытия АТД.



**Рис. 2.** Сектор эффективного диска покрытия, определяемый границами здания, перекрывающего прямую видимость АТД.

Для вычисления площади области  $S_{gain}$  определим кратчайшее  $d_s$  и максимальное  $d_L$  расстояния от АТД до здания, которые можно записать с помощью следующих формул:

$$d_s = \sqrt{\frac{1}{4}l^2 + d_x^2 - d_x l \sin(\omega)}, \quad d_L = \min \left[ \Lambda_H, \sqrt{\frac{1}{4}l^2 + d_x^2 + d_x l \sin(\omega)} \right],$$

где

$$\theta = \arccos \left( \frac{d_x^2 - \frac{1}{4}l^2}{d_s d_L} \right), \quad \beta = \arctan \left( \frac{\cos(\theta) - \frac{d_s}{d_L}}{\sin(\theta)} \right), \quad \theta' = \arccos \left( \frac{d_s \cos(\beta)}{\left( 1 - \frac{H_b - H_u}{H_a - H_u} \Lambda_H \right)} \right).$$

Из рис. 3 видно, что площадь  $S_{gain}$  можно вычислить как разность площади сектора круга радиуса  $\Lambda_H$  и площади треугольника  $ost$ , то есть

$$S_{gain} = \frac{1}{2} \left( \theta' \Lambda_H^2 - L^2 \frac{\sin(\theta') \sin(\alpha)}{\sin(\theta' + \alpha)} \right),$$

где

$$L = \frac{d_s (H_a - H_u)}{H_a - H_b}, \quad \alpha = \arccos \left( \frac{d_s^2 + \frac{1}{4}l^2 - d_x^2}{l d_s} \right).$$

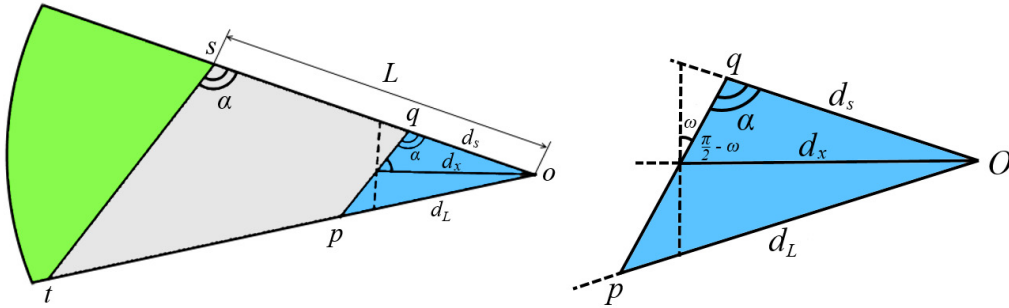


Рис. 3. Дополнительные геометрические построения.

Минимальное  $S_{gain}^{(-)}(x)$  и максимальное  $S_{gain}^{(+)}(x)$  значения площади – нижняя и верхняя границы оценки  $S_{gain}$  соответственно – находятся по следующим формулам:

$$S_{gain}^{(-)}(x) = \frac{\theta}{2} \left[ \Lambda_H^2 - \left( \frac{d_L}{1 - \frac{H_b - H_u}{H_a - H_u}} \right)^2 \right]^+, \quad S_{gain}^{(+)}(x) = \frac{\theta}{2} \left[ \Lambda_H^2 - \left( \frac{d_s}{1 - \frac{H_b - H_u}{H_a - H_u}} \right)^2 \right]^+.$$

## 4. Численный эксперимент

В качестве исходных данных для численного анализа будем использовать следующие параметры модели: расстояние между проекцией точки доступа и центром здания  $d_x = 25$  м; длина здания  $l = 6$  м; угол отклонения здания от его перпендикулярного по-

ложения к АТД  $\omega = \frac{\pi}{4}$ ; радиус действия точки доступа  $R_{\max} = 100$  м; высота здания  $H_b = 30$  м; высота пользователя  $H_u = 2$  м; а высота точки доступа  $H_a$  изменяется в интервале от 45 м до 75 м.

Для проведения численного анализа по полученным аналитическим формулам было разработано программное средство на языке программирования Python 3.6.5.

На рис. 4 приведен график зависимости  $S_{gain}$  от высоты точки доступа. Пунктирной линией обозначена нижняя граница  $S_{gain}^{(-)}$ , а точечной линией – верхняя  $S_{gain}^{(+)}$ . По графику видно, что с ростом высоты расположения точки доступа площадь  $S_{gain}$ , открываемая за тенью здания, также увеличивается до определенного порога. Сокращение площади  $S_{gain}$  при дальнейшем увеличении высоты объясняется уменьшением радиуса эффективного диска покрытия. Таким образом, для заданных исходных данных максимальная площадь зоны покрытия обеспечивается при расположении АТД на высоте около 55 м.

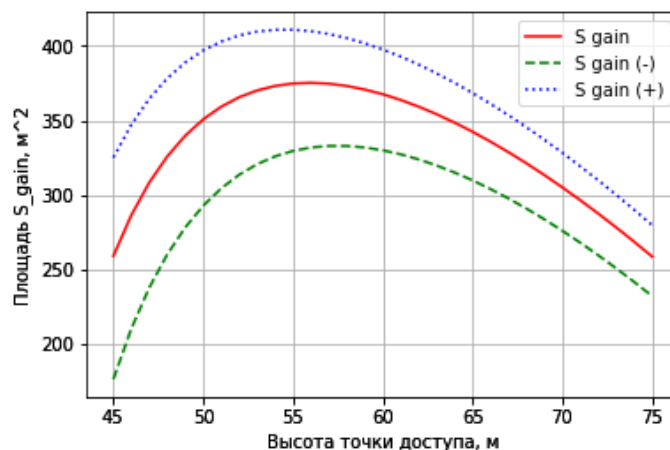


Рис. 4. График зависимости  $S_{gain}$  от высоты точки доступа.

## 5. Заключение

В работе рассмотрена модель взаимодействия устройств сети Air-To-Everything в городской среде, которая позволяет оценить эффект блокировки сигнала крупными объектами, в частности, зданиями. Полученная с помощью методов стохастической геометрии зависимость площади зоны покрытия от высоты расположения беспилотного летательного аппарата, на котором реализована точка доступа, позволяет оценить ключевой показатель качества передачи данных точкой доступа в миллиметровых волнах – вероятность блокировки соединения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках программы 5-100 и РФФИ в рамках научных проектов № 17-07-00845, 18-07-00576.

## Список литературы

1. Huang K., Heath R.W. Jr. Connectivity and Blockage Effects in Millimeter-Wave Air-To-Everything Networks // arXiv:1808.00144 [cs.IT]. 2018. Vol. 10.
2. Han K., Cui Y., Wu Y., Huang K. The connectivity of millimeter wave networks in urban environments modeled using random lattices // IEEE Trans. Wireless Commun. 2018. Vol. 17. P. 3357-3372.
3. Kovalchukov R., Moltchanov D., Samuylov A., Ometov A., Andreev S., Koucheryavy Y., Samouylov K. Analyzing Effects of Directionality and Random Heights in Drone-based mmWave Communication // IEEE TVT. 2018. Vol. 67, No. 10. P. 10064-10069. DOI: 10.1109/TVT.2018.2857215.